

Mémoire

Auteur : Kwemi Ndjeudja, Nicole Brel

Promoteur(s) : El Jarroudi, Moussa

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18455>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**ETUDE COMPARATIVE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES
FAVORISANT LA ROUILLE JAUNE SUR LA CULTURE TRITICALE
AVEC CEUX FAVORISANT LA MEME MALADIE SUR LE CULTURE
DE BLE AU GRAND-DUCHE DU LUXEMBOURG**

KWEMI NDJEUDJA NICOLE-BREL

**MÉMOIRE RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN
SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ SPÉCIALISÉE**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

REDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE : Dr El Moussa Jarroudi

COMITE DE LECTURE :

LECTEUR 1 : Bernard Tychon

LECTEUR 2 : Fadia Chairi

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège-Campus Environnement d'Arlon.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège-Campus Environnement d'Arlon.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : **KWEMI NDJEUDJA NICOLE-BREL**,
nicolebrelkwemi@yahoo.fr

Dédicace

Ce travail est dédié :

- **Au Seigneur tout-puissant**
- **À la grande famille KWENDJA**
- **À la grande famille NDJEUDJA**

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide des personnes (physiques et morales) suivantes :

Tout à bord permettez-moi de remercier le staff d'enseignement du campus d'Arlon en général et ceux de l'Equipe Eau-Environnement-Développement (EED) qui a bien voulu que je réalise ce stage dans leur équipe et au sein de leur circonscription administrative ;

Ensuite je tiens à remercier le Dr MOUSSA El Jarroudi mon maitre de stage qui de par son intelligence, sa rigueur dans le travail, son sens de la transition, ses remarques suggestions et orientations permanentes a témoigné du rôle et du plaisir qu'il avait à me suivre pendant ce stage, il n'a pas manqué de répondre à mes interrogations et inquiétudes, de m'accompagner sur le terrain et de me faire connaître tout ce que je devrais savoir pendant cette période, je me souviens encore des encouragements qu'il ne cessait de m'adresser : « beaucoup de courage ».

Je vais ensuite remercier l'équipe de la Luxembourg Institute of Sciences and Technology (*LIST*) avec qui nous étions sur le terrain et qui ne manquait de nous confier une tâche ;

Je remercie également mes coéquipiers Issam Melki et Chernii Mariem avec qui, nous avons partagé tout ce temps tant sur le terrain qu'au campus pour la rédaction de ce travail ; l'entente, la compréhension, la symbiose, le respect, la politesse et le sens du travail en équipe ont été notre partage pendant ce stage ;

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes camarades du module Pays En Développement (PED) et du Master en Sciences et Gestion de L'Environnement (MSGGE) avec qui nous avons partagés des connaissances pendant cette période, l'entraide n'a cessé de régner.

Je remercie affectueusement la famille Djeukwe, Famy, Je remercie ma famille nucléaire pour le soutien multiforme ;

Je remercie également mes amis et particulièrement Tchakounté Joseph, Tella Colince, Tengho Serge et Takam Michel qui n'ont cessé de demander comment le stage se déroulait et surtout de m'encourager.

La liste des remerciements n'étant pas exhaustive que chacun de mes bien-aimés en ce qui le concerne se sente remercier pour tout l'accompagnement à moi accordé.

RESUMÉ

La phytopathologie des céréales est devenue une problématique préoccupante aujourd'hui pour le Luxembourg vu l'importance des productions céréalières dans l'alimentation humaine et animale.

Au Luxembourg, les céréales sont atteintes par plusieurs maladies dont la rouille jaune. À cet effet, nous avons mené cette étude donc l'objectif est de comparer les paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur la culture triticales avec ceux favorisant la même maladie sur le blé au Luxembourg en vue de comprendre le développement de *Puccinia.Striiformis* sur le blé et le triticales.

La méthodologie adoptée pour ce travail a été la suivante : pour ce qui est de la maladie, des relevés sur les symptômes (cotation) de la rouille ont été réalisés hebdomadairement sur dix plants choisis de manière aléatoire dans des parcelles d'environ 12 m² (soit 8 m x 1,5 m environ), ainsi que des informations sur le stade de développement de triticales et du blé ; Les données météorologiques utilisées sont celles de la station de Bettendorf gérées et entretenues par l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) du Luxembourg.

Ayant analysé les données de l'année 2020, les résultats ont montré que le climat de cette année a été favorable au développement de la rouille jaune avec un hiver doux, un printemps frais et humide. Pour ce qui est de la caractérisation de la rouille jaune tant sur le blé que sur le triticales, nous avons pu constater que la maladie débutait sur les premières feuilles à se former avant de se propager vers les feuilles dites émergentes (F3, F2 et F1), aussi les symptômes commencent à apparaître entre le mois de mai et celui de juin et atteignent leur pic à partir du stade 65 au stade 71. Le modèle étudié ayant prédit avec précision l'apparition de la maladie dans le site de Bettendorf sur les deux cultures, il peut être utilisé pour prédire la rouille jaune sur le triticales. À la fin de cette étude, nous pouvons suggérer aux agriculteurs et à toutes les parties prenantes du ministère de l'agriculture et de la viticulture luxembourgeoise de commencer le traitement de triticales dès la date de semis, et de penser à faire des cultures de contre saison surtout dans un contexte de variations climatiques.

Mots clés : comparaison, paramètres météorologiques, triticales, blé, *Puccinia Striiformis*

ABSTRACT

Cereal plant pathology has become a major issue in Luxembourg today, given the importance of cereal production for human and animal consumption.

Cereals in Luxembourg are affected by several diseases, including yellow rust. To that end, we the aim of this study was to compare the meteorological parameters favouring yellow rust on triticale with those favouring the same disease on wheat in Luxembourg, with a view to understanding the development of *Puccinia Striiformis* on wheat and triticale.

The methodology adopted for this work was as follows: with regard to the disease, records of rust symptoms (scoring) were taken weekly on ten randomly selected plants in plots of approximately 12 m² (i.e. approximately 8 m x 1.5 m), together with information on the development stage of triticale and wheat; the meteorological data used were those from the Bettendorf station managed and maintained by the Agricultural Technics Administration services (ATAS) in Luxembourg.

Having analysed the data for 2020, the results showed that this year's climate was favourable to the development of yellow rust, with a mild winter and a cool, wet spring. With regard to the characterisation of yellow rust on both wheat and triticale, we were able to observe that the disease began on the first leaves to form before spreading to the so-called emerging leaves (F3, F2 and F1). Symptoms began to appear between May and June and reached their peak from stage 65 to stage 71. As the model studied accurately predicted the appearance of the disease at the Bettendorf site on both crops, it can be used to predict yellow rust on triticale. At the end of this study, we can suggest to farmers and to all stakeholders in the Luxembourg Ministry of Agriculture and Viticulture to start treating triticale from the sowing date, and to think about growing off-season crops, especially in a context of climatic variations.

Key words: comparison, meteorological parameters, triticale, wheat, *Puccinia Striiformis*

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Evolution de la production des principales céréales dans le monde (FAO, 2012) ..	24
Figure 2: Production/Utilisation des stocks céréaliers mondiaux (FAO 2023 : Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales).....	26
Figure 3: Cycle de la rouille jaune, W. Zheng et al, 2013.....	35
Figure 4: Feuille recouverte par des pustules de rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017) ; (B) Pustules noires contenant des téléospores (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).....	37
Figure 5: Symptômes de rouille jaune (Abdi, 2015).....	39
Figure 6: Les outils d'aide à la décision, de la recherche aux agriculteurs (Dubrulle et al., 2014)	47
Figure 7: Image du site de Bettendorf (Issam Melki, 2022)	50
Figure 8: Diagramme ombrothermique du Luxembourg (climate data.org luxembourg.)	51
Figure 9: Echelle de la sévérité de la rouille (Koyshibayev et Muminjanov, 2016 in Remi Meurs)	54
Figure 10: étapes du modèle de prédiction de la rouille.....	55
Figure 11: Comparaison des surfaces foliaires vertes et celles attaquées	59
Figure 12: Evolution des symptômes sur le triticale	60
Figure 13: Evolution de la sévérité de la maladie en fonction des stades de développement de la variété Lombardo (A) et Kasyno (B) et par étage foliaire (YRF1 à YRF6).....	60
Figure 14: Evolution de la rouille en fonction du stade de développement	62
Figure 15: Nombre d'infections pendant la période culturale	64
Figure 16: Pourcentage de la surface foliaire atteinte par les maladies cryptogamiques sur blé d'hiver à Bettendorf en 2020.....	67
Figure 17: Evolution de la rouille jaune sur les feuilles de blé en fonction des variétés	70
Figure 18: Latence de la rouille jaune sur le blé	71
Figure 19: Conditions météorologiques de 2020-2021	72
Figure 20: Variation de l'humidité relative en fonction de la température.....	73
Figure 21: Evolution des surfaces foliaires de triticale atteintes par la rouille jaune.....	2
Figure 22: Principes de fonctionnement des modules de Proculture (El Jarroudi et al., 2011)	8

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Producteurs de triticales dans le monde	28
Tableau 2: Surfaces agricoles utilisées au Luxembourg	29
Tableau 3: Les dix premiers producteurs de blé dans le monde (106 Tonnes/an)	32
Tableau 4: Classification de <i>Puccinia Striiformis</i> f.sp . tritici Erikss	34
Tableau 5: Conditions environnementales nécessaires au développement la rouille jaune	42
Tableau 6: récapitulatif des paramètres généraux favorisant la rouille jaune sur les céréales	43
Tableau 7: Paramètres utilisés dans la prédiction de la rouille jaune.....	56
Tableau 8 : ANOVA de la sévérité en fonction des variétés	61
Tableau 9: Comparaison de la sévérité présente sur chaque variété	61
Tableau 10: ANOVA de la sévérité en fonction du stade de développement de la variété Kasyno.....	62
Tableau 11: ANOVA de la sévérité en fonction du stade de développement de la variété Lombardo	62
Tableau 12 : Comparaison de la sévérité des stades de développement de la variété Lombardo	63
Tableau 13: Comparaison de la sévérité des stades de développement de la variété Kasyno	63
Tableau 14: tableau de contingence de prédiction de la rouille jaune sur le triticales	65
Tableau 15 : comparaison de la précipitation, l'humidité relative et de la température en présence et en absence de l'infection	66

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Evolution des surfaces foliaires de triticales atteintes par la rouille jaune par feuille	1
Annexe 2: Feuille de collecte des données	2
Annexe 3: Données météorologiques analysées	3
Annexe 4: quelques illustrations des latences calculées	3
Annexe 5: stade de développement des céréales	4
Annexe 6 : Date de la première apparition des symptômes de la rouille jaune sur triticales	5
Annexe 7: Quelques exemples de modèles de prévisions des maladies des céréales	6
Équation 8 : Tableau de comparaison des surfaces vertes aux surfaces atteintes.....	8

LISTE DES ABRÉVIATIONS

°C :	Dégré Celsius
ANOVA :	<i>Analysis Of Variance</i>
ASTA :	Administration des Services Techniques de l'Agriculture
C.R.A.Gx :	Centre wallon de Recherches agronomiques
CIC :	Conseil International des Céréales
COVID :	Corona-Virus
CRP :	Centre de Recherche Public
EED :	Eau Environnement Développement
F.U.S.A.Gx :	Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GDL :	Grand-Duché du Luxembourg
GES :	Gaz à Effet de Serre
<i>LIST</i> :	<i>Luxembourg Institute of Science and Technology</i>
MAVDRL :	Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement Rural du Luxembourg
mm :	Millimètre
MSGE :	Master en Science et Gestion de l'Environnement
MT :	Millions de Tonnes
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
PAC :	Politique Agricole Commune
PED :	Pays en Développement
PIB :	produit intérieur brut
UE :	Union Européenne

Table des matières

Dédicace	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	13
1.1 Contexte.....	14
1.2 Problématique	15
1.3 Objectifs.....	17
1.3.1 Objectif global.....	17
1.3.2 Objectifs spécifiques	17
1.3.3 Hypothèse de recherche	17
1.4 INTÉRÊT DE L'ÉTUDE	17
CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	20
2.1 Contexte et évolution de l'agriculture luxembourgeoise.....	21
2.2 Situation actuelle de l'agriculture luxembourgeoise	21
2.3 Généralités de la céréaliculture mondiale.....	24
2.4 Généralités sur la culture triticales	26
2.4.1- Situation de triticales au niveau mondial	27
2.4.2 Situation de triticales au niveau national du Luxembourg.....	28
2.4.3 Importance économique	29
2.4.4 Utilisation du triticales.....	30
2.5 Généralités sur la culture du blé	30
2.5.1- Situation mondiale du blé	31
2.5.2- Importance économique du blé	32
2.5.3- Situation nationale du blé au Luxembourg	32
2.6- Généralités sur la rouille jaune	33
2.6.1- Historique et état des lieux.....	33
2.6.2- Classification.....	34

2.6.3- Cycle de la rouille jaune	35
2.6.4- Les hôtes de la rouille jaune.....	36
2.6.5- Les symptômes généraux de la rouille jaune	37
2.7- Paramètres favorisant la rouille jaune	40
2.7.1- Influence des facteurs climatiques	40
2.7.2- Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille jaune	42
2.8- Potentialités adaptatives du pathogène et ses interactions avec l'environnement.....	43
2.9- Méthode de lutte contre la rouille jaune.....	44
2.10 - Modèle de météorologique de prédiction de la rouille jaune	45
2.10.1- Modélisation	45
2.10.2- Types de modèles.....	46
2.10.3- Modélisation comme outil d'aide à la décision	47
CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES	49
3.1 Description de la zone d'étude	50
3.1.1 Choix et localisation du site expérimental	50
3.1.2 Caractéristiques météorologiques	51
3.1.3 Caractéristiques édaphiques	52
3.1.4 Végétation, faune et flore	53
3.2- Approche méthodologique	53
3.2.1- Détermination des stades phénologiques	53
3.2.2- Cotation de la maladie.....	53
3.3- Données météorologiques	54
3.4- Traitement des données.....	55
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	58
4.1. RESULTATS.....	59
4.1.1- Caractérisation de la rouille jaune sur le triticale	59
4.1.2- Caractérisation de la rouille jaune sur le blé	66
4.1.3- Description des conditions météorologiques de la saison culturale de 2020	71
4.1.4- Comparaison des résultats obtenus de la caractérisation de la rouille jaune sur le triticale et sur le blé	73
4.2 Interprétation et discussions	73
4.3 Limites de l'étude	76
4.4 Implication de ces résultats pour la prévention de la rouille jaune sur le blé et sur triticale.....	76
CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES	77
BIBLIOGRAPHIE	81

ANNEXES 1

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Contexte

Selon L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) dans son article « Comment nourrit-on le monde aujourd'hui ? », du temps des chasseurs-cueilleurs d'hier à celui des chaînes de valeur agricole, halieutique et alimentaire d'aujourd'hui, l'humanité a toujours redouté de ne plus produire assez d'aliments pour nourrir une population de plus en plus abondante. En réalité, les agriculteurs augmentent continuellement leur production, à un rythme supérieur à celui de la croissance de la population et des revenus. Les activités agricoles se sont d'abord étendues géographiquement. Puis, vers le milieu du XXe siècle, l'accroissement de la production alimentaire s'est peu à peu émancipé de l'agrandissement des superficies agricoles : entre 1960 et aujourd'hui, la population mondiale a plus que doublé, la production alimentaire a plus que triplé et les surfaces agricoles ont crû d'au moins 15%.

Les agriculteurs ont intensifié la production en recourant à des intrants plus performants, comme les engrais de synthèse, les variétés améliorées et les produits phytopharmaceutiques, et en adoptant de meilleures pratiques de gestion, telles que la rotation des cultures pour préserver les sols et l'irrigation pour mieux maîtriser les apports d'eau. Ces innovations ont permis de produire davantage sur une même superficie et avec la même quantité d'eau, quoique, trop souvent, en accentuant les pressions exercées sur les ressources naturelles.

Il est donc essentiel d'avoir des systèmes alimentaires sains, durables et inclusifs pour atteindre les objectifs mondiaux de développement. Le développement de l'agriculture est l'un des leviers les plus puissants sur lequel agir pour mettre fin à l'extrême pauvreté, renforcer le partage des richesses et nourrir les 9,7 milliards de personnes que comptera la planète en 2050 (Banque mondiale, 2022). Comparée à d'autres secteurs, la croissance de l'agriculture a des effets deux à quatre fois plus efficaces sur l'augmentation du revenu des populations les plus démunies. L'agriculture est aussi un facteur essentiel de croissance économique : en 2018, elle représentait 4% du produit intérieur brut (PIB) mondial et, dans certains pays en développement parmi les moins avancés, sa part peut dépasser 25% du PIB (Banque mondiale, 2022).

Or, les conditions de production des aliments varient énormément d'un endroit à l'autre. Celles-ci, combinées à plusieurs autres facteurs, risquent de mettre en péril la capacité de l'agriculture à tirer la croissance, à réduire la pauvreté et à améliorer la sécurité alimentaire. Des perturbations liées à la phytopathologie, à la pandémie de COVID-19, aux phénomènes

météorologiques extrêmes, en passant par les invasions acridiennes et les conflits, exposent les systèmes alimentaires à de multiples chocs qui entraînent une hausse des prix des denrées et une aggravation de la faim. Aujourd'hui, la guerre en Ukraine est à l'origine d'une crise alimentaire mondiale qui entraîne plusieurs millions de personnes supplémentaires dans l'extrême pauvreté.

Aussi depuis quelques années, l'agriculture ne peut plus uniquement se contenter de produire mais doit répondre à de nouveaux enjeux qui sont à la fois sociétaux et environnementaux. Une large partie de la population s'est rendue compte de l'impact de l'agriculture sur l'environnement et sur la santé humaine, l'agriculture se doit donc d'être plus propre et ce, notamment en réduisant l'utilisation de produits phytosanitaires, d'intrants chimiques, etc. (Actu environnement, 2009). De plus, face au changement climatique, une partie de l'Europe, dont le Luxembourg, va faire face à une augmentation des risques liés aux ravageurs et aux maladies fongiques (Tröschler). L'accélération des dérèglements climatiques, en particulier, pourrait amputer la production agricole, en particulier dans les régions du monde qui souffrent déjà d'une insécurité alimentaire.

1.2 Problématique

L'agriculture occupe une place relativement petite dans l'économie du Luxembourg, représentant environ 0,4% du PIB du pays. Cependant, l'agriculture est importante pour la production alimentaire locale, la gestion des terres et la préservation de l'environnement. Les principales cultures du Luxembourg comprennent les céréales (blé, orge, seigle), les pommes de terre, les légumes, les fruits et le fourrage. La culture des céréales est considérée comme l'une des premières grandes découvertes ayant exercé une influence majeure sur l'avenir des sociétés humaines. Encore aujourd'hui, les céréales constituent la base de notre alimentation en raison de la facilité des modes de production, de récolte, de stockage et de transport, de la diversité des aires géographiques de production, de leur richesse en éléments d'intérêt nutritionnel et de la diversité des modes de préparation et de consommation. (Par Joel Abecassis et al, 2009).

Cependant, le secteur agricole a connu, plus que tout autre secteur économique au Luxembourg, un environnement fortement changeant au cours de ces dernières années en raison de la taille relativement petite du pays et de la forte urbanisation dues à la fragmentation des terres, la concurrence foncière avec d'autres utilisations et la pression environnementale. Il devait et doit donc continuer à s'adapter en permanence à l'évolution des conditions

météorologiques ainsi qu'à l'intensification de la concurrence dans le contexte de la mondialisation (Agriculture Luxembourgeoise en chiffres, 2020).

Aussi, le Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement Rural du Luxembourg (MAVDRL) dans son rapport « Luxembourg Agriculture and Forestry » publié en 2021 identifie plusieurs menaces de l'agriculture Luxembourgeoise donc les différents problèmes de phytopathologie touchant les céréales, notamment le blé et le triticale. Les maladies les plus fréquentes sont la rouille jaune, la septoriose, la fusariose et la rhynchosporiose. Ces maladies sont souvent gérées par des pratiques culturales telles que la rotation des cultures, l'utilisation de semences saines, la fertilisation appropriée et la pulvérisation de fongicides. Les programmes de surveillance et de gestion intégrée des maladies sont également en place pour aider à prévenir la propagation des maladies. Alors que, selon les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O), en 2020, la production totale de céréales au Luxembourg était d'environ 12 000 tonnes qui sont inférieure aux besoins céréaliers du pays et entraîne une forte importation de l'ordre de 67%.

Le développement de la lutte raisonnée repose sur une meilleure compréhension des relations entre les plantes hôtes et les agents pathogènes pour positionner un traitement fongicide ; mais aussi la compréhension des liens qui existent entre les conditions favorisant la prolifération de ces pathogènes sur les céréales en général et la culture du blé et de triticale en particulier d'où la question de recherche principale : **Quels sont les paramètres météorologiques qui favorisent la rouille jaune sur la culture de triticale par rapport à ceux qui favorisent la même maladie sur le blé ?** Une étude comparative des conditions environnementales associées à la prévalence de la rouille jaune sur ces différentes cultures permettra-t-elle d'identifier des différences significatives dans les facteurs favorisant la maladie et d'élaborer des recommandations pour la prévention et la gestion de la rouille jaune sur les cultures de céréales les plus sensibles ?

Plus spécifiquement il s'agira de savoir :

- Quelles sont les caractéristiques de la rouille jaune sur le triticale et le blé ?
- Quelles sont les paramètres météorologiques qui favorisent la rouille jaune sur le triticale ?
- Quelles sont les paramètres météorologiques qui favorisent la rouille jaune sur le blé ?

- Quelle relation existe-elle entre les différents paramètres favorisant la rouille jaune sur le blé et ceux favorisant la rouille jaune sur triticales ?
- Comment les résultats de cette étude pourraient-ils être utilisés pour améliorer les pratiques agricoles et réduire la propagation de la rouille jaune dans les cultures de blé et de triticales ?

1.3 Objectifs

1.3.1 Objectif global

L'objectif global de cette étude est de comparer les paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur la culture triticales avec ceux qui favorisent la même maladie sur le blé au Luxembourg.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Pour cette étude les objectifs spécifiques sont entre autres :

- Identifier les caractéristiques de la rouille jaune sur la culture de triticales et de blé.
- Analyser les paramètres météorologiques qui favorisent la rouille jaune sur la culture de triticales.
- Analyser les paramètres météorologiques qui favorisent la rouille jaune sur la culture de blé.
- Comparer les résultats obtenus pour les deux cultures.
- Discuter des implications des résultats pour la prévention de la rouille jaune sur la culture de triticales et de blé.

1.3.3 Hypothèse de recherche

L'hypothèse nulle (H0) que nous allons tester pour cette étude est que les paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur triticales sont identiques à ceux favorisant la même maladie sur le blé, tandis que l'hypothèse alternative est que ces conditions diffèrent.

1.4 INTÉRÊT DE L'ÉTUDE

- **Pour le milieu scientifique**, la présente étude sera d'une importance capitale car elle aidera à améliorer notre compréhension de la maladie et à aider à développer des mesures de lutte plus efficaces. En comparant les conditions météorologiques qui favorisent la maladie sur la culture du blé et sur la culture du triticales, cette recherche

peut aider à mieux comprendre les différences entre ces cultures en termes de sensibilité à la maladie et de stratégies de lutte à mettre en place ; et enfin les résultats de cette recherche peuvent également être appliqués à d'autres maladies des cultures de céréales, en aidant à mieux comprendre les conditions environnementales qui favorisent leur développement.

- **Pour les agriculteurs**, cette étude est importante car elle leur permettrait de mieux comprendre les conditions environnementales qui favorisent la prévalence et la sévérité de la rouille jaune sur la culture du triticale et sur la culture du blé, deux cultures importantes au Luxembourg. En connaissant les seuils de température, d'humidité relative et de précipitations qui favorisent le développement de cette maladie, les agriculteurs pourraient mieux planifier les stratégies de gestion de la maladie et prendre des mesures préventives pour réduire les pertes de rendement et la quantité de fongicides utilisés. Cela pourrait également contribuer à une production agricole plus durable et respectueuse de l'environnement en réduisant l'utilisation excessive de fongicides.
- **Pour le Ministère de l'Agriculture et de la Viticulture Luxembourgeoise**, cette étude pourrait aider à mettre en place des programmes de surveillance et de prévention plus ciblés et efficaces, ce qui pourrait réduire les coûts associés aux traitements et minimiser les pertes de récoltes causées par la maladie.
- **L'importance de cette étude pour l'Union Européenne (UE)**, réside dans le fait que la rouille jaune est une maladie qui peut avoir un impact important sur les cultures céréalières dans l'ensemble de l'UE, ce qui peut entraîner des pertes économiques considérables. En outre, l'étude comparative des paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur le triticale en comparaison avec le blé au Luxembourg pourrait contribuer à l'amélioration des pratiques agricoles et de la gestion des maladies dans l'ensemble de l'UE, en fournissant des informations plus précises sur les conditions environnementales qui favorisent la propagation de la maladie. Cela pourrait aider les agriculteurs à mieux prévenir et gérer les maladies des cultures, ce qui pourrait avoir des impacts positifs sur la sécurité alimentaire et l'approvisionnement en céréales dans l'ensemble de l'UE.

- **Au niveau international,** Tout d'abord, la rouille jaune est une maladie fongique commune dans de nombreuses régions du monde, affectant diverses cultures céréalières. Les résultats de cette étude peuvent donc être utiles pour d'autres pays confrontés à cette maladie en leur fournissant des informations sur les paramètres environnementaux qui favorisent la croissance et la propagation du champignon responsable de la maladie. De plus, l'étude met en évidence l'importance de prendre en compte les conditions météorologiques dans la planification et la gestion des cultures céréalières pour prévenir les maladies fongiques et améliorer les rendements. Cette approche peut être appliquée dans d'autres pays, aidant ainsi les agriculteurs à mieux gérer leurs cultures et à augmenter leur productivité. Enfin, cette étude peut également contribuer à l'amélioration de la sécurité alimentaire mondiale en aidant à prévenir les pertes de cultures causées par la rouille jaune et en augmentant la production de céréales.

CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Contexte et évolution de l'agriculture luxembourgeoise

Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Viticulture Luxembourgeoise, durant la deuxième moitié du 20^e siècle, l'agriculture luxembourgeoise se trouve, comme toutes les agricultures européennes, dans un profond processus de restructuration. Il s'agit de la période de préparation et d'intégration de l'agriculture luxembourgeoise dans le Marché commun européen. Pendant cette période, l'agriculture luxembourgeoise est marquée par la disparition de 8.000 exploitations agricoles, une régression de la superficie agricole utilisée de 6.000 ha, une diminution de la population et de la main-d'œuvre agricole, un essor de la mécanisation, un recours croissant à l'innovation grâce à de nombreux moyens et techniques de production nouveaux et une nette réorientation des productions de grande culture vers la production bovine et l'apparition de l'agriculture biologique.

On assiste à un processus de concentration des exploitations et d'accroissement de la productivité. L'agriculture au Luxembourg a connu une évolution importante au cours des dernières décennies. Dans les années 1950 et 1960, l'agriculture était principalement axée sur la production laitière et la culture des céréales. Cependant, avec la modernisation de l'agriculture et l'augmentation des coûts de production, de nombreux agriculteurs ont dû chercher des sources de revenus alternatives et le nombre des exploitations principales de plus de 50 ha a augmenté et leur taille moyenne est passée de 64 ha à 104 ha.

Aujourd'hui, l'agriculture luxembourgeoise se caractérise par une diversification des productions, avec une forte présence de l'élevage, de la viticulture et de l'horticulture. Les exploitations agricoles sont également de plus en plus spécialisées et de plus en plus grandes. Le gouvernement luxembourgeois a mis en place des politiques pour soutenir l'agriculture locale, notamment en fournissant des subventions aux agriculteurs pour la préservation de l'environnement et la promotion des produits locaux. Cependant, l'agriculture luxembourgeoise doit encore faire face à des défis tels que la concurrence des produits agricoles importés et la pression foncière due à l'urbanisation croissante.

2.2 Situation actuelle de l'agriculture luxembourgeoise

Même si le secteur primaire ne représente que 0,2 % de l'économie du pays (valeur ajoutée brute totale) et emploie 0,8 % de la population totale, les zones agricoles occupent plus de la moitié du territoire national. L'agriculture luxembourgeoise se concentre sur un nombre

limité de produits (lait, viande, vin et céréales). Avec une augmentation de 11,2 % de la population vivant dans les zones rurales entre 2015 et 2020, la campagne luxembourgeoise est attrayante en raison de sa petite taille (qui facilite la proximité entre les centres économiques), de sa diversité paysagère et de sa bonne connexion à large bande.

En ce qui concerne l'utilisation des terres, la superficie agricole représente 53 % de la superficie du pays, contre 36 % pour la superficie forestière.³⁵ Le Luxembourg compte 1970 exploitations agricoles, dont la moitié de plus de 50 ha. 6% de sa surface agricole est consacrée à l'agriculture biologique, avec 114 producteurs biologiques en 2020.

La stratégie luxembourgeoise relevant de la Politique Agricole Commune (PAC) vise à assurer un développement durable dans le secteur agricole, en mettant en œuvre les objectifs économiques, environnementaux et sociaux de la PAC. L'une des principales priorités est de garantir des revenus plus équitables aux producteurs agricoles et de renforcer la compétitivité des entreprises agricoles et agroalimentaires. L'accent est également mis sur le renouvellement des générations dans les exploitations agricoles, en particulier en soutenant l'installation de jeunes agriculteurs. Enfin, le plan luxembourgeois vise à développer l'agriculture biologique, à réduire l'utilisation des pesticides, les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et d'ammoniac, ainsi qu'à promouvoir la séquestration du carbone.

Au Luxembourg, le revenu agricole représente environ un tiers du salaire moyen dans l'ensemble de l'économie. Pour remédier à ce problème, le Luxembourg apportera un soutien direct aux agriculteurs afin de garantir un revenu viable et de renforcer la résilience et la compétitivité de l'ensemble du secteur, tout en assurant un développement durable. La totalité de la superficie agricole utilisée du Luxembourg (132 000 ha) est soumise à des contraintes naturelles et autres. C'est la raison pour laquelle les agriculteurs recevront une aide supplémentaire, qui compensera les difficultés auxquelles ils sont confrontés.

En raison de sa petite taille et du nombre réduit d'agriculteurs, le Luxembourg dispose d'un système de connaissances et d'innovation agricoles reposant sur un petit nombre d'acteurs bien connectés les uns aux autres. Ce système est coordonné par le Ministère de l'Agriculture et rassemble des chercheurs, des enseignants, des conseillers et des agriculteurs. Alors que les financements nationaux devraient répondre aux besoins de partage des connaissances et d'innovation dans le pays, le Luxembourg continuera de jouer un rôle actif dans les échanges

au niveau européen en participant au réseau de la PAC de l'UE. En outre, les parties prenantes et les utilisateurs finaux peuvent être associés aux projets multi acteurs d'Horizon Europe.

Selon le rapport d'activités 2021 du Luxembourg, l'année 2021 a été celle avec des conditions météorologiques extrêmes par rapport à celles de la période de référence 1991-2020. Par conséquent, on a eu une météo favorable à la production fourragère, mais difficile pour les céréales et le colza de sorte que les rendements étaient décevants pour ces cultures en 2021.

Il est aussi à noter que l'agriculture luxembourgeoise est confrontée à plusieurs défis, notamment la concurrence accrue sur le marché international, la pression croissante sur les ressources naturelles telles que l'eau et les sols, et la nécessité de répondre aux normes de production durable et de sécurité alimentaire.

En outre, elle est confrontée à un vieillissement de la population agricole et à un manque de main-d'œuvre qualifiée pour assurer la pérennité de la production agricole. Le gouvernement luxembourgeois a mis en place des mesures pour soutenir le secteur agricole, notamment en encourageant la diversification des cultures, la modernisation des infrastructures agricoles, et en promouvant l'agriculture biologique et la production locale.¹

1

<https://www.luxembourgforbusiness.lu/en/assets/docs/agriculture%2Dfood/AGRICULTURE%2DAND%2DFOOD%2DINDUSTRY%2DIN%2DLUXEMBOURG.pdf>
<https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-09/csp-at-a-glance-luxembourg-fr.pdf>
<https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2022-09/csp-at-a-glance-luxembourg-fr.pdf>
<https://agriculture.public.lu/fr/actualités/chiffres-cles>
<https://www.indexmundi.com/fr/luxembourg/agriculture.html>

2.3 Généralités de la céréaliculture mondiale

La culture des céréales représente un secteur économique important. En effet, c'est un aliment de base d'une très grande partie de la population mondiale. Les pays importateurs et exportateurs de céréales dépendent les uns des autres et ont intérêt à garantir l'approvisionnement de cette denrée alimentaire et à maintenir des prix stables au niveau mondial. Ils collaborent avec les organisations internationales, en particulier le Conseil International des Céréales (CIC), dont le siège est à Londres (kellou, 2008). La situation de la céréaliculture est liée à l'évolution des superficies, des productions et par conséquent des rendements des céréales obtenus. Le classement de l'année 2012 des dix premiers producteurs indique que la Chine vient en première position. Par contre les Etats unis se situent en troisième position (tableau1). Sept pays assurent les 3/4 des exportations mondiales et ce sont dans l'ordre les Etats-Unis (20 %), l'Australie (12.1 %), la France (11.3 %), le Canada (10.1 %), l'Argentine, la Russie et l'Ukraine (FAO, 2012). La production mondiale des trois principales céréales a connu une fluctuation de production. L'année la plus prédictive est 2008/2009 avec une production totale de 863.77 Millions de Tonnes répartie en 683,19 MT de blé (79,09 %), 51.55MT d'Orge (17,91 %) et d'avoine (2.99 %) (figure 1).

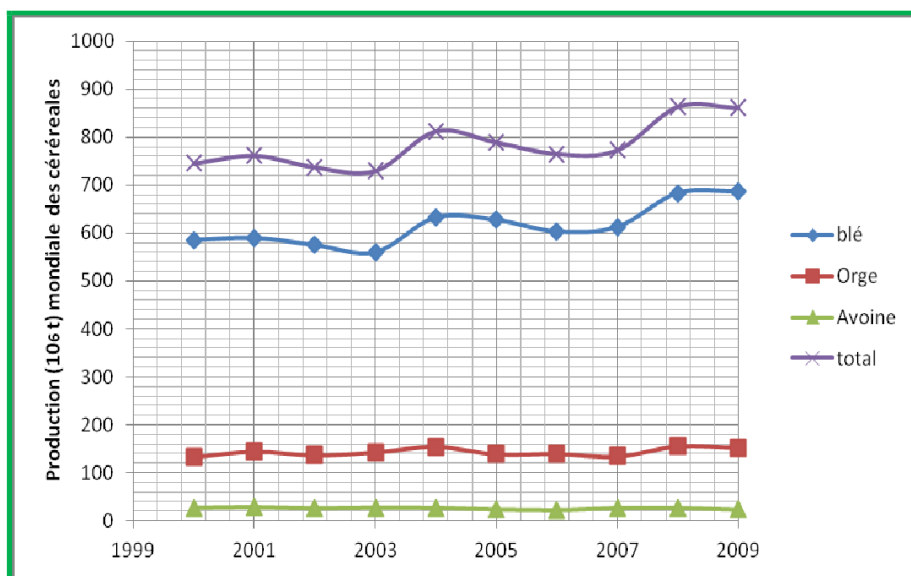


Figure 1: Evolution de la production des principales céréales dans le monde (FAO, 2012)

Selon le Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales, aucun pays de l'Union Européenne ne fait partie de ceux classés comme étant Pays à Faible Revenu et à Déficit Vivrier (PFRDV). Seuls font partie certains pays de l'Afrique, de l'Amérique et de l'Asie. Les dernières prévisions de la FAO concernant la production mondiale de céréales en 2022 ont été relevées de 9 millions de tonnes ce mois-ci (Mars 2023) et s'établissent à présent à 2 774 millions de tonnes, soit une nouvelle baisse de 1,3 pour cent en glissement annuel. À 2 780 millions de tonnes, les prévisions concernant l'utilisation mondiale de céréales en 2022-2023 sont quasiment inchangées ce mois-ci (Mars 2023) et indiquent toujours un fléchissement de 0,6 pour cent par rapport au niveau de 2021-2022. À la suite d'une révision à la baisse de 1,4 million de tonnes apportée ce mois-ci (Mars 2023), l'utilisation totale de céréales secondaires dans le monde en 2022-2023 devrait reculer de 1,5 pour cent par rapport à 2021-2022, du fait des contractions attendues dans l'utilisation de toutes les principales céréales secondaires (maïs, orge et sorgho). Les prévisions de la FAO relatives à l'utilisation mondiale de blé ont elles aussi été relevées depuis le précédent rapport, de 1,8 millions de tonnes, principalement en raison de l'augmentation prévue de l'utilisation de blé dans l'alimentation animale dans l'Union européenne, où le resserrement des disponibilités intérieures de maïs et la hausse de l'offre de blé devraient déboucher sur un remplacement du maïs par le blé dans ce secteur. Cette révision à la hausse porte les prévisions concernant l'utilisation totale de blé en 2022-2023 à 779 millions de tonnes, soit 0,8 pour cent de plus qu'en 2021-2022. Les stocks mondiaux de céréales à la clôture de la campagne de 2023 devraient diminuer de 1,2 pour cent par rapport à leurs niveaux d'ouverture et s'établir à 844 millions de tonnes, car les prélèvements prévus sur les stocks mondiaux de céréales secondaires et de riz devraient contrebalancer un accroissement des stocks de blé. Pour 2023, les premières prévisions de la FAO au sujet de la production mondiale de blé indiquent un recul en glissement annuel, mais le résultat global prévu, 784 millions de tonnes, serait tout de même le deuxième plus important jamais enregistré. En Europe, les prévisions provisoires indiquent un repli global de la production de blé. En Fédération de Russie, compte tenu des conditions météorologiques plus sèches que la moyenne dans les régions du sud et d'un recul des semis d'hiver sur fond de tassement des prix intérieurs, la production de blé devrait baisser par rapport au niveau record de 2022. En Ukraine, au vu des graves difficultés financières, des dommages causés aux infrastructures et de l'inaccessibilité des champs dans certaines parties du pays, on s'attend, en 2023, à une diminution de 40 pour

cent en glissement annuel des superficies de blé d’hiver et à une production de blé bien en dessous de la moyenne. Les semis de blé dans l’Union européenne devraient rester quasiment au même niveau en 2023 et, avec un temps généralement favorable laissant augurer de bonnes conditions dans les champs, on prévoit une production totale de 136,5 millions de tonnes, un chiffre comparable aux bons résultats de l’année dernière.

Date de publication: 03/03/2023



Figure 2: Production/Utilisation des stocks céréaliers mondiaux (FAO 2023 : [Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales](#))

2.4 Généralités sur la culture triticale

À ce niveau nous allons présenter l’origine de la culture triticale, sa situation mondiale et nationale Luxembourgeoise, de ses caractéristiques

Le triticale est une culture céréalière hybride issue d’un croisement entre le blé (genre *Triticum*) et le seigle (genre *Secale*). L’organisation des différentes espèces du triticale, appartiennent donc à deux genres différents : *Triticum* et *Sécale*.

Etant l’hybride interspécifique entre le blé et le seigle, le triticale présente des caractéristiques souvent intermédiaires entre ses deux parents.

- **les racines**

Le système racinaire des triticales est fasciculé et est constitué par trois types de racines :

- Radicules : racines embryonnaires ;

- Racines adventices embryonnaires ;
- Racines adventices qui apparaissent au niveau du premier ou du second entre nœud (Gasper et Bunatru, 1985).
- **La tige**

La tige du triticales lui donne aspect robuste et vigoureux par rapport à ses deux parents. La tige a une longueur intermédiaire à celle de ces deux parents : 1,20 m à 1,30 m, mais son diamètre est supérieur 2 à 6 cm chez les variétés courantes et 5 à 8 cm chez les variétés naines. (Zemerline ,1990).

- **Les feuilles**

Les feuilles des triticales sont semblables à celles des autres céréales de sa tribu, leur longueur est égale à celle de celles du blé, entre 15 à 25 cm mais leur diamètre est supérieur à celle des deux parents (SIMON et al, 1989 *in* benmoussa et al, 2020). À la base du limbe foliaire se trouvent la ligule et les oreillettes qui sont en général grandes avec une bordure plissée ; chez certaines variétés de triticales, la ligule présente une bordure colorée en rouge (Kiss et al, 1977 *in* Hormisdas Hariyongabo, 2008).

2.4.1- Situation de triticales au niveau mondial

Le triticales n'est pas cultivé à grande échelle dans le monde. L'intérêt que suscite cette nouvelle espèce est surtout dû à sa valeur alimentaire (très bonne en protéines) (BELAID, 1986). Cependant les caractéristiques des deux parents ont incité les chercheurs à étudier la faisabilité d'une culture de cette espèce sur des superficies importantes. Les deux principaux types de triticales qui sont couramment mis en culture correspondent le plus souvent à deux situations :

- Types d'hiver dans le Nord de l'Europe ;
- Types de printemps dans la zone aride (LAROUCHE et al. ,1994)

Il faut noter cependant que dans certaines régions, le triticales a tellement convaincu les agricultures qu'il est même parvenu à dépasser son parent le seigle en termes de surface consacrée à la culture comme en France (Soltner, 1999). Actuellement, malgré son faible développement face aux céréales classiques, le triticales occupe néanmoins une superficie de plus de trois millions d'hectares avec en tout une centaine de génotypes cultivés (Bernard ,1992) ; les surfaces cultivées ne cessent d'augmenter. L'Europe est de loin le premier producteur mondial. La Pologne, l'Allemagne et la France représentent plus de 60 % de la

production mondiale de triticales. La culture commence également à se développer en Russie, aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil ou en Chine. (Source: FAOSTAT 2006)

Le tableau suivant reprend les superficies consacrées à la culture du triticales par les principaux pays producteurs.

Tableau 1 : Producteurs de triticales dans le monde

Rang	Pays	Production de triticales (million de tonnes)
1	Pologne	5.2
2	Allemagne	3
3	Biélorussie	2.1
4	France	2
5	Russie	0.7
6	Chine	0.5
7	Hongrie	0.5
8	Espagne	0.4
9	Lituanie	0.4
10	Autriche	0.3

Source : FAOSTAT 2014

2.4.2 Situation de triticales au niveau national du Luxembourg

Au Luxembourg, la culture de triticales a pris de l'importance au cours des dernières décennies en raison de ses avantages agronomiques et économiques. Elle est cultivée sur environ 10 % de la superficie totale des cultures céréalières et est souvent utilisée comme culture de rotation pour améliorer la qualité des sols et prévenir les maladies.

La culture de triticales est pratiquée au Luxembourg depuis les années 1950. Actuellement, la culture de triticales couvre environ 10% de la surface agricole du pays. Le triticales est cultivé principalement pour l'alimentation animale, car il est riche en protéines et en énergie. Il est également utilisé pour la production de biocarburants et pour l'alimentation humaine, en particulier pour la fabrication du pain et de pâtes.

Le triticales est bien adapté aux conditions climatiques du Luxembourg, car il est résistant au froid et peut être cultivé sur des sols pauvres en nutriments. La culture de triticales est également avantageuse pour l'environnement, car elle nécessite moins d'engrais et de pesticides que d'autres cultures de céréales. Les principales variétés de triticales cultivées au Luxembourg sont le triticales d'hiver et le triticales de printemps. Les semences de triticales sont produites localement par des agriculteurs spécialisés ou importées d'autres pays de l'Union Européenne.

On constate une augmentation des surfaces agricoles réservées pour la culture de triticales au Luxembourg témoignant ainsi de son importance.

Tableau 2: Surfaces agricoles utilisées au Luxembourg

Céréales	32.980	28.639	29.713	29.288	27.857	27.960	26.309	27.393
Froment et épeautre	8.625	10.971	14.009	14.494	13.808	14.185	12.984	13.458
Seigle	557	672	896	896	904	951	1.082	1.137
Orge	15.682	10.538	8.261	7.713	6.901	6.594	6.004	6.064
Avoine et céréales secondaires en mélange	5.723	2.379	1.348	1.381	1.390	1.520	1.419	1.644
Maïs-grain	-	255	375	141	125	81	91	143
Triticale	2.272	3.635	4.780	4.604	4.609	4.520	4.669	4.911
Autres céréales	121	189	44	59	119	108	61	36
Légumes secs cultivés pour la graine	537	431	336	588	682	621	409	407
Pommes de terre	826	829	615	570	615	622	627	601
Plantes industrielles	1.999	3.344	4.867	5.199	4.631	4.310	4.780	3.931
Colza	1.951	3.245	4.715	3.973	3.508	3.267	3.393	2.883
Plantes fourragères	19.024	25.523	25.371	26.091	27.040	27.393	28.821	28.545
Maïs	7.473	10.799	13.435	13.648	14.192	14.538	14.990	15.070
Prairies temporaires	-	14.178	11.461	10.990	10.909	11.122	12.063	11.745
Légumineuses fourragères	-	469	447	955	1.005	1.017	904	863
Betteraves fourragères	-	77	27	137	154	111	77	79
Autres cultures	22	2	717	784	807	903	904	812

Source : Agriculture Luxembourgeoise en chiffres 2020 (Ministère de l'Agriculture, de la viticulture et du développement rural luxembourgeois)

2.4.3 Importance économique

Selon Brouwer(1976), le triticales est une céréale bien appréciée non seulement à cause de la richesse nutritive de ses produits mais également sa plasticité et sa rusticité lui conférant tout de même des rendements satisfaisants dans des étages pédoclimatiques difficiles. Son importance économique est accentuée par la variété de son utilisation que ce soit au niveau de l'alimentation humaine ou animale comme fourrage, il pourrait participer à combler le déficit de la production nationale afin de réduire la facture des importations des céréales.

Également, les intérêts économiques du triticales sont :

- Une conduite économique en intrants ; grâce à sa rusticité ;
- Une productivité élevée (rendement en grains) ;
- Une production en paille plus élevée que celle des autres céréales d'hiver ;
- Une utilisation en alimentation animale pour l'économie du tourteau ;

- Une utilisation de la farine de triticales en mélange avec la farine de blé tendre, contribue à la réduction des importations de cette dernière ;
- Une marge brute, dégagée par la culture d'un hectare de triticales, plus élevée que celle de l'avoine et de l'orge. (Anonyme, 2006).

Néanmoins, bien que le monde ne soit pas près de substituer l'un ou l'autre des céréales naturelles par le triticales, l'emploi du grain de triticales au niveau de la meunerie et autres usages reste un créneau intéressant à exploiter.

2.4.4 Utilisation du triticales

Le triticales se prête à une multitude d'utilisations que ce soit pour les besoins directs dans l'alimentation humaine, fourrage pour les animaux et autres utilisations diverses.

a) Alimentation des animaux

Compte tenu de leur composition sensiblement proche dans plusieurs composés chimiques, le triticales donné aux animaux comme fourrage fournit des résultats comparables à ceux obtenus avec le blé. D'autre part, selon LAROCHE et al. (1994) le triticales étant beaucoup plus riche en lysine que le blé, son emploi dans une ration équilibrée permet de réduire d'environ de 10 % la ration de tourteaux et la réduction du taux azoté de l'aliment.

b) Pour les ruminants

Selon Laroche (1994), le triticales donne les mêmes résultats que le blé fourrager pour l'élevage de ruminants en Europe. Les essais d'utilisation du triticales sous forme de grains pour les élevages de ruminants en Algérie ont abouti à des résultats plus satisfaisants que dans le cas d'utilisation de l'orge ou du seigle (Benbelkacem, 1987). La concentration des efforts sur le développement de la culture du triticales à grande échelle comme c'est le cas de l'arboriculture dans le cadre de la PNDAR (Programme National du Développement Agricole et Rural) serait sans doute une solution pour réduire le déficit en fourrage. Par conséquent, et de limiter les importations d'énormes quantités de maïs qui sans parler de la lourde charge financière qu'elles exigent apportent souvent des risques sanitaires comme la contamination par des mycotoxines.

2.5 Généralités sur la culture du blé

Le Blé est un terme générique qui désigne plusieurs céréales appartenant au genre « Triticum ». Ce sont des plantes annuelles de la famille des graminées ou poacées, cultivées dans de très nombreux pays. C'est une céréale donc le grain est un fruit sec et indéhiscents, appelé

caryopse constitué d'une graine et des téguments (Feille, 2000). Les deux espèces qui dominent aujourd'hui la production sont : le blé tendre et le blé dur (Amira Djahida et *Al*, 2013).

Les différentes variétés de blé sont classées comme suit :

- Le blé dur cultivé dans les pays de climat chaud et sec, les grains de blé dur sont allongés, souvent même pointus, avec des enveloppes assez minces et légèrement translucides. Il donne moins de son que le blé tendre, bien que contenant plus de gluten (12 à 14 %), se prête moins bien à la panification. C'est un blé utilisé essentiellement en semoulerie, pour la fabrication des pâtes alimentaires et des couscous (Abecassis .1993).
- Le blé tendre, ou froment, (*Triticum aestivum*) le plus important, est davantage cultivé dans les hautes latitudes (par exemple en France, au Canada, en Ukraine). Il est cultivé pour faire la farine panifiable utilisée pour le pain. Les grains des blés sont arrondis, les enveloppes sont épaisses, sans transparence. Il est destiné à la panification, la biscuiterie la biscotterie.

2.5.1- Situation mondiale du blé

En botanique le blé dur, est l'une des céréales, le plus employé dans l'alimentation et donne de la semoule pendant la mouture, cette semoule est valorisée dans la fabrication des pâtes alimentaires (Jeantet et al. (2006) Cité *in* Mouellef, 2010). De plus en Afrique du Nord, on utilise aussi cette céréale pour la production de couscous et des pains traditionnels (la galette) (Feillet, 2000).

L'aire d'origine des blés est le proche Orient, dans la zone dite du Croissant fertile, l'Irak, la Syrie et la Turquie (Baldy, 1986 *in* Lamara Asma, 2019). La diffusion du blé vers l'Europe, l'Asie et l'Afrique du Nord est très ancienne.

La production mondiale de blé fut en croissance constante durant les cinquante dernières années et s'élève pour la campagne 2010-2011 à 691,5 millions de tonnes soit trois fois plus que pour la campagne 1960-1961 (Terrones Gavira et *al*, 2012). Cette hausse de la production de blé est principalement due à une augmentation constante des rendements à l'hectare (multiplié par 2,8 sur les cinquante dernières années) plutôt qu'à une augmentation des surfaces mondiales cultivées en blé. En effet, le nombre d'hectares cultivé en blé, après avoir connu une augmentation jusqu'en 1981 (239,2 millions d'hectares de blé), n'a pas cessé de diminuer pour atteindre 216,8 millions d'hectares en 2010.

Avec une production de 8.08 millions de tonnes par an, moyenne de la période 1994-2007, l'Union Européenne est le plus grand producteur de blé dur (Tableau 3). Le Canada arrive au deuxième rang avec 4,6 millions de tonnes par an, suivi de la Turquie et des États-Unis, avec 1.99 et 2.67 millions de tonnes respectivement. Ces quatre pays fournissent à eux seuls les deux tiers de la production mondiale.

Tableau 3: Les dix premiers producteurs de blé dans le monde (106 Tonnes/an)

Rang	Pays	Production (10 ⁶ t)
1	Chine	115.18
2	Inde	80.80
3	Etats Unis d'Amérique	60.10
4	Fédération Russe	41.51
5	France	40.79
6	Allemagne	24.11
7	Pakistan	23.31
8	Canada	23.16
9	Australie	22.13
10	Turkie	19.66

Source : FAO 2012

2.5.2- Importance économique du blé

Le blé est l'une des premières plantes domestiquées par l'homme, il est largement cultivé dans le monde (Xiaojie et al., 2012). Cette culture représente plus de 90% de la production mondiale des blés (Ghennai et al., 2017). Le blé est principalement utilisé pour faire du pain, des nouilles, des biscuits et des gâteaux (Lopes et al., 2012). Selon le Conseil International du Grain (CIC, 2016), la production mondiale du blé est passée, de 611 à 736 millions de tonnes, au cours de la période allant de 2007-08 à 2015-16. Ce niveau de production dépasse largement les besoins de la population mondiale avec des stocks en hausses (CIC, 2016). La Chine, l'Union Européenne, l'Inde, la Russie et les USA sont les plus gros producteurs de blé. Les pays exportateurs sont les USA, le Canada et l'Union Européenne ainsi que la Russie. Les gros importateurs sont la Chine et l'Egypte (CIC, 2016). L'Afrique participe pour 25% à la production mondiale du blé (CIC, 2016).

2.5.3- Situation nationale du blé au Luxembourg

La culture du blé est une activité importante au Luxembourg, bien qu'elle occupe une superficie moins importante que la culture de maïs et de pommes de terre. Selon les statistiques

de la FAO (2002), la production de blé au Luxembourg s'élevait à environ 19 000 tonnes en 2020. Le blé est principalement cultivé pour la production de farine destinée à la panification.

Le Luxembourg cultive principalement des variétés de blé d'hiver, qui sont semées à l'automne et récoltées en été. Les variétés les plus courantes sont le blé tendre, le blé dur et le blé hybride. Les agriculteurs luxembourgeois sont confrontés à des défis tels que les maladies fongiques et les conditions météorologiques défavorables, qui peuvent affecter la qualité et la quantité de la récolte de blé. Il existe également une petite production de blé bio au Luxembourg, qui répond à la demande croissante de produits biologiques sur le marché intérieur et européen. Le blé d'hiver est la culture la plus importante (11 947 ha de froments d'hiver) au Grand-Duché de Luxembourg; en 2006, la prairie couvre 10 480 ha. Or le blé est sujet à des maladies (Moussa jarroudi et al, 2009).

2.6- Généralités sur la rouille jaune

2.6.1- Historique et état des lieux

Si au cours des trois dernières décennies le secteur céréalier a été secoué par plusieurs épidémies de rouille jaune (Jacquemin et al., 2016), il semble cependant que depuis 2012, les attaques soient plus fréquentes et surtout géographiquement plus étendues (Cheyron, 2016). L'explication réside sûrement dans la simultanéité des facteurs climatiques favorables (hiver peu rigoureux) et l'apparition de nouvelles races qui est un contournement de résistance (Jacquemin et al., 2016 ; Cheyron, 2016).

En 2014, la race dominante en Europe fût « Warrior/Ambition » (Bataille et al., 2015), également nommée Warrior 1 (Jacquemin et al, 2016). Cette souche provenant des régions himalayennes, est arrivée en Europe en 2011 (Bataille et al., 2017 ; Watillon & Bodson, 2017) et est actuellement omniprésente en Wallonie comme en atteste l'épidémie de 2014 (Bataille et al., 2017).

Warrior dispose d'une diversité génétique importante qui a donné lieu à plusieurs variantes dont Warrior 3 (également nommé Warrior (-) en raison de son spectre de virulence plus restreint). (Bataille et al., 2017 ; Jacquemin et al., 2016). Cette dernière serait présente depuis 2015 et semble être la race dominante en 2016 (Bataille et al., 2017).

C'est une race particulièrement agressive. Elle déjoue en effet les gènes de résistance dès le stade plantule et semble disposer d'une capacité de multiplication plus importante (cycle

de développement plus court) que les anciennes races qu'elle a supplantées (Bataille et al., 2015). De plus, ses exigences thermiques et sa sensibilité aux UV (Ultra-Violet) semblent moindres, elle est largement distribuée à travers le globe (Aussi bien en Espagne qu'en en Suède) (Bataille et al., 2015 ; Grare, 2014).

En raison de sa capacité de dispersion élevée, elle est largement répandue à travers le monde, mais ce sont les régions littorales qui sont les plus touchées, tant en termes de présence que de virulence (Watillon & Bodson, 2017).

2.6.2- Classification

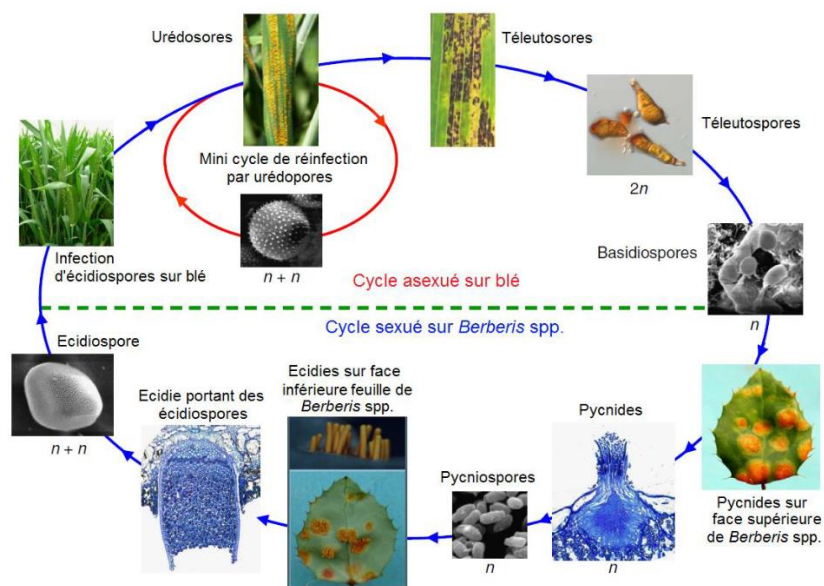
La rouille jaune est une maladie fongique causée par *Puccinia striiformis* Westend anciennement connu sous le nom de *P. recondita f. sp. tritici* (Huerta-Espino et al., 2011). La sous-espèce touchant le blé tendre et triticales est *Puccinia Striiformis f.sp . tritici* Erikss mais elle peut être également observée sur l'orge ou le blé dur ; ce champignon appartient à la classe des basidiomycètes et est strictement biotope (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Tableau 4: Classification de *Puccinia Striiformis f.sp . tritici Erikss*

<i>Puccinia Striiformis f.sp. Tritici Erikss</i>	
Règne	Eumycètes (fungi)
Embranchement	Basidiomycètes
Classe	Urediniomycètes/ Pucciniomycètes
Ordre	Uredinales/Pucciniales
Famille	Puciniaceae
Genre	Puccinia
Espèce	<i>Puccinia Striiformis f.sp. Tritici Erikss</i>

Source : Amil 2016 in Meurs 2018

2.6.3- Cycle de la rouille jaune



Source : W. Zheng et al. 2013. High genome heterozygosity and endemic genetic recombination in the wheat stripe rust fungus. *Nature communications*. DOI: 10.1038/ncomms3673

Figure 3: Cycle de la rouille jaune, W. Zheng et al, 2013

La rouille jaune est un champignon hétéroïque. De plus, il réalise deux types de cycle : un cycle asexué et un cycle sexué. Le cycle asexué se réalise sur ses hôtes primaires qui sont principalement le blé, l'épeautre et le triticale. Le cycle sexué se réalise, quant à lui, sur son hôte secondaire à savoir l'épine-vinette (*Berberis* spp.) (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Le champignon passe l'hiver sur les repousses de céréales ou sur les jeunes plantes semées en automne sous forme d'urédospores. Ces dernières peuvent survivre à des températures allant jusqu'à -4°C (Livre Blanc Céréales, 2017). Le pathogène peut aussi passer l'hiver sous forme de mycélium en dormance. Il peut survivre à des températures allant jusqu'à -10°C . (Rapilly, 1979 ; Livre Blanc Céréales, 2017; BASF, 2019). Les graminées adventices infectées peuvent être des hôtes de la rouille (Syngenta France, 2020).

La reproduction asexuée va être observable à la fin de l'hiver. En effet, les urédies (petits conceptacles en forme de petits cratères contenant les urédospores) vont apparaître (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990). Tant que les conditions météorologiques le permettent, les urédospores seront produites. L'optimum des températures est compris entre 10 et 15°C et une humidité relative de 100% est nécessaire pour que les spores germent. Au-dessus de 20°C , le champignon est inhibé à l'exception de certaines souches tolérantes (BASF, 2019). Ces spores sont

transportées par le vent sur de longues distances (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Il faut 6 à 8 jours après l'infection pour que les symptômes soient observables. Les pustules apparaissent, quant à elles, 12 à 14 jours après l'infection si les conditions sont favorables (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Jusqu'à six cycles peuvent se succéder au cours d'une saison culturale (Bahri, 2008).

Le cycle sexué n'a, quant à lui, jamais été observé en Europe. En effet, pour boucler ce cycle, il faut une synchronisation entre la prévalence, la susceptibilité et la phénologie de l'hôte alternatif (l'épINETTE-VINETTE) *Berberis spp.* et celle de l'hôte primaire à savoir une céréale ou une graminée sauvage (Livre Blanc Céréales, 2017; Rodriguez-Algaba et al., 2021). Cependant, le début du cycle sexué peut avoir lieu. En effet, le déclenchement de la sénescence des tissus ou une élévation des températures peuvent entraîner la production de téléutospores noires. Ces pustules noires, plus allongées que les urédies et contiennent des téléutospores ayant pour vocation de permettre la recombinaison génétique, de survivre durant l'intersaison et de germer au printemps afin d'assurer la survie du parasite en infectant un hôte intermédiaire. En l'absence d'hôtes écidien, ce cycle n'a pas lieu en Europe (Bahri, 2008).

Les repousses et certaines graminées sauvages permettent à la maladie de survivre durant la période estivale, il est donc important de les détruire. L'inoculum ayant survécu sur les repousses peut en effet infecter les nouvelles plantes de blé d'hiver dès le stade 2 feuilles (Morais, 2015). Durant l'hiver, la maladie progresse peu. C'est à la sortie de l'hiver et au printemps que son développement peut rapidement se généraliser. Les attaques précoces (durant la montaison) sont celles qui ont le plus d'impact sur le rendement (Bahri, 2008).

2.6.4-Les hôtes de la rouille jaune

Puccinia striiformis f. sp. tritici Erikss (Pst) a notamment pour hôte primaires le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et le blé dur (*T.turgidum var. durum L.*). (Watillon & Bodson, 2017 ; Chen et al., 2014).

Cependant, *P. striiformis* disposent de nombreux autres hôtes teleutosporien tels que le triticales (Triticosecale), le seigle (*Secale cereale L.*) et certaines orges cultivées (*Hordeum vulgare L.*) mais n'induit généralement pas de pertes importantes. En outre, cette maladie se retrouve sur les espèces d'herbes de pâturages améliorés. (Chen et al., 2014).

Auparavant ses hôtes secondaires n'avaient pas été identifiés, c'est pourquoi la littérature plus ancienne considérait *P. striiformis* comme une rouille monoïque (Lepoivre, 2003 ; Bovey, 1967).

Actuellement, on lui attribue les hôtes alternatifs *pycnidien/aecial* suivants : l'épine-vinette (*Berberis chinensis*, *B. koreana*, *B. holstii*, *B. vulgaris*, *B. shensiiana*, *B. potaninii*, *B. dolichobotrys*, *B. heteropoda*) (Chen et al., 2014 ; Yue Jin, 2011) et Le Mahonia faux houx ou Mahonia à feuilles de houx (*Mahonia aquifolium*) (Chen et al., 2014). Cependant, en Europe son cycle sexué n'a pas encore été observé, en raison de la phénologie et la prévalence des hôtes principaux et secondaire qui ne sont pas coordonnés (Watillon & Bodson, 2017).

2.6.5- Les symptômes généraux de la rouille jaune

Cette partie présente comment se manifeste de manière générale la maladie sur les céréales. Nous allons ensuite faire une présentation de la maladie propre à la culture du blé ; cependant nous ne ferons pas une présentation propre à la culture triticales car nous n'avons pas trouvé dans la littérature une présentation spécifique de ces symptômes sur ladite culture.



Figure 4: Feuille recouverte par des pustules de rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017) ; (B) Pustules noires contenant des téleutospores (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017)

Les pustules jaunes orangées de 0,5 mm de diamètre sont alignées sur les feuilles supérieures entre les nervures et forment des stries (Figure 4). Lorsque les pustules sont encore en incubation, des chloroses apparaissent dans le sens des nervures. À un stade avancé, les pustules deviennent noirâtres (Arvalis, 2013).

Les premiers symptômes sont le plus souvent observés entre mars et avril. Cependant, lorsque les conditions sont favorables, la maladie peut être observée dès le mois de février (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). Ce sont des pustules jaunes présentes sur les feuilles basses de certaines plantes. L'infection se propage ensuite aux plantes adjacentes et gagne les différents étages foliaires de la plante pour, parfois, atteindre l'épi. Des foyers circulaires sont

observables au niveau du champ. Si les conditions climatiques le permettent, l'infection peut rapidement se propager à tout le champ (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990).

Les symptômes sont caractérisés par des fructifications ou sores ressemblant à de petits cratères contenant à maturité une poussière rousse constituée de milliers de spores. Ces petites pustules mesurent entre 0.3 mm et 1 mm de long (Figure A). Ces spores peuvent être emportées par le vent sur de longues distances. Dans le cas de la rouille jaune, ces petits cratères sont alignés le long des nervures des feuilles et des tiges (F.U.S.A.Gx and C.R.A.Gx, 1990). En fin d'épidémie, après la floraison du blé, le champignon se met à produire des pustules noires allongées contenant des téleutospores (Figure B) (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Selon Afzal et al. (2007) (*in* Meurs et al 2013), dans les situations où la rouille jaune se développe précocement, de manière continue et si le cultivar est sensible, les pertes peuvent aller jusqu'à 100 %, ce qui signifie une destruction totale de la culture. Cependant, dans la plupart des cas, les pertes oscillent entre 10 % et 70 % en fonction de la précocité de l'attaque, de la sensibilité variétale, de la durée d'infection par la maladie et du taux de développement durant l'infection.

a) Rouille jaune du blé

Du fait de leur importance économique, les agents pathogènes des plantes cultivées, font partie des systèmes hôte/parasite les plus étudiés, même si les aspects évolutifs ne sont abordés que depuis peu. Parmi les champignons pathogènes les mieux décrits, les rouilles du blé (jaune/brune/noire) ont un rôle central, la rouille jaune du blé étant notamment à l'origine de la découverte de la ségrégation mendélienne des gènes de résistance spécifique.

Décrite pour la première fois en 1777 (cf. Chen, 2005), la rouille jaune a été l'objet d'étude de nombreuses équipes de pathologistes en Europe, en raison de l'importance de ses épidémies dans le nord-ouest du continent. Cette maladie aérienne est causée par un champignon strictement biotrophe, *Puccinia striiformis* Westend. f.sp. *tritici* Erick (*PST*) (Basidiomycète de l'ordre des Urédinales) qui interagit avec son hôte, le blé, sur la base de la relation gène pour gène. La dissémination est assurée par des urédospores dicaryotiques, aucune phase sexuée n'ayant été décrite à ce jour. Depuis la domestication du blé il y a 8 000 ans, on suppose que l'hôte et le parasite ont coévolué dans un agro-système influencé principalement par l'homme et le climat.

b)- Symptômes et dégâts

La symptomatologie de la rouille jaune est singulière. Contrairement aux autres rouilles des céréales, la rouille jaune peut apparaître du stade une feuille jusqu'à la maturité de la céréale. Les symptômes apparaissent une semaine après infection et les spores au bout de 2 semaines, en conditions optimales de température (Maumené 2008).

La maladie se manifeste, chez la plante adulte, par des lésions linéaires semi-systémiques qui se développent parallèlement aux nervures des feuilles. Celles-ci sont composées de pustules pulvérulentes jaunes en forme de stries, allongées et alignées entre les nervures. Lorsqu'elles sont mûres, les pustules éclatent pour libérer un grand nombre de spores jaunes dorées. Ces stries, caractéristiques de la maladie, justifient l'appellation de « stripe rust » donnée par les américains à la maladie et l'épithète latine *striiformis* du nom de l'espèce.

Les feuilles, les gaines, les tiges, les glumes et même parfois les grains peuvent être atteints, ce qui entraîne une baisse voire une absence de photosynthèse et des pertes de production conséquentes.

La sévérité des attaques de rouille jaune varie selon la sensibilité des cultivars et leur précocité. Sur des variétés sensibles, les pertes de rendement peuvent atteindre 40 % à 70 % (James et Clifford, 1983 ; McIntosh et al., 1995) voire être totales (Solis-Moya et al., 2007). Outre l'action sur le rendement, ce parasite a aussi des effets dépressifs sur la qualité des lots récoltés (Rapilly et al., 1971).

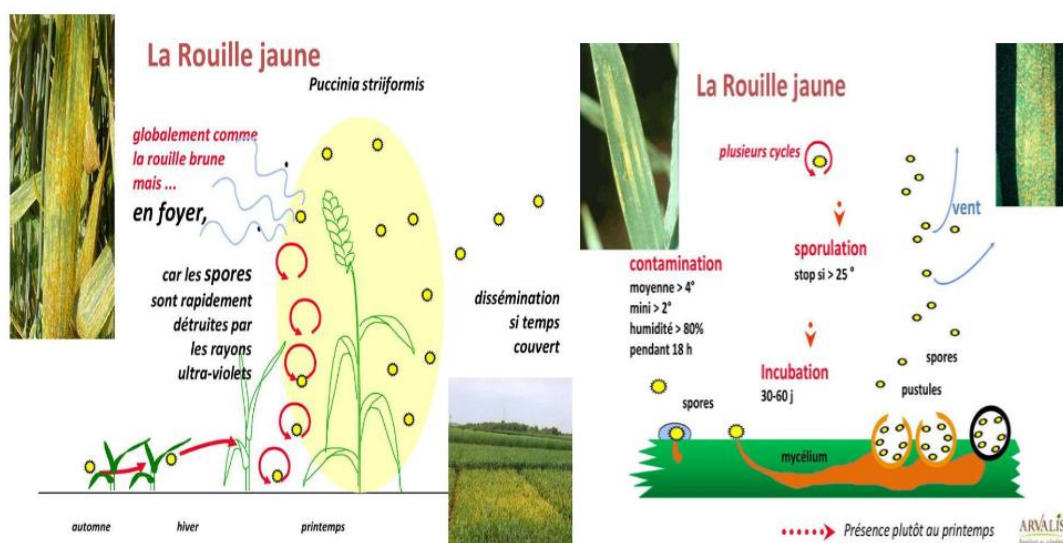


Figure 5: Symptômes de rouille jaune (Abdi, 2015)

Depuis 2011, la sévérité de la maladie est très importante et a été observée en France, Belgique, Grand-Duché de Luxembourg et dans une grande partie de l'Europe. Sa progression est liée au cycle de développement très rapide mais également à l'apparition d'une nouvelle souche appelée « Warrior », très virulente et résistante (Moussa El Jarroudi et al., 2017).

c)- Les races de de *Puccinia Striiformis f.sp* et les cultivars de blé

Il a été constaté qu'en fonction du cultivar de blé, la rouille pourrait avoir des moindres effets.

Par ailleurs, il existe de nombreuses résistances et gènes qui en sont à l'origine de ces résistances dont : les gènes qui s'expriment dès le stade plantule et ce durant toute la croissance de la plante, ce sont « les gènes majeurs », ils sont à l'origine de la résistance spécifique et offrent à la plante une protection totale, « les gènes de résistances adultes » ou « gènes mineurs » ne s'activent qu'à partir d'un stade de développement spécifique (qui est être à partir de la montaison) ; ils donnent lieu à une résistance générale et fournissent une protection partielle (Cheyron P., 2016 ; Bataille et al., 2015 ; Aliaga C., 2014).

En parallèle, il existe un large éventail de races physiologiques de ce pathogène. Celles-ci contournent les mécanismes de résistances mis en place par les végétaux, créant ainsi de nouvelles races avec le gène d'« avirulence » correspondant (Bataille et al., 2015 ; Mascher et al., 2010).

2.7- Paramètres favorisant la rouille jaune

2.7.1- Influence des facteurs climatiques

Dans la littérature, la rouille jaune est largement reportée comme un pathogène se développant dans un environnement frais. D'autres facteurs ont, eux, une importance secondaire dans la propagation de la maladie, comme par exemple le vent (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017 ; Savary et al., 2016).

Selon Savary et al. (2016), le développement de la rouille jaune est associé à des températures moyennes de saison. Bahri (2008) reporte que la rouille jaune est un pathogène qui se développe à des températures fraîches qui peuvent aller de -10°C à 25°C. D'après le Livre Blanc Céréales (2017), les températures optimales permettant un développement de la rouille se situent entre 9°C et 15°C. Au-delà de 15°C, le pathogène ralentit peu à peu.

Le champignon passe l'hiver sous forme d'urédospores sur les repousses de céréales ou les cultures à semis automnal précoce ou de mycélium en dormance. Sous cette dernière forme, moins exposé aux conditions hivernales hostiles, le champignon peut survivre à de très faibles températures (jusqu'à -10°C). Au printemps, lorsque le climat devient frais et humide, le champignon reprend son développement pour initier les contaminations secondaires via la production de nouvelles urédospores. Ces urédospores présentent la caractéristique d'être regroupées en amas appelés « unités de dissémination ».

L'élévation des températures maximales au-dessus de 25°C ralentit ou arrête le développement de la rouille jaune (Bahri, 2008). C'est pourquoi il ne subsiste, le plus souvent, que des nécroses à partir de juin (Syngenta, 2017).

Les températures cardinales de germination sont, quant à elles, relativement basses (Bahri, 2008) :

- Température minimale de germination : 2°C
- Température optimale de germination : 10°C
- Température maximale de germination : 28°C

Savary et al. (2016) décrivent des limites plus restrictives pour la germination des spores. Selon eux, les spores peuvent germer dans une gamme de températures allant de 5°C à 20°C , avec un optimum à 15°C . L'infection est, quant à elle, associée à une gamme de températures assez étroite se trouvant entre 5°C et 12°C . Concernant la période de latence du champignon, celle-ci dure de 10 à 14 jours dans une gamme de températures assez large allant de 13°C à 23°C , la température n'influençant que modérément la durée de la période de latence (Savary et al., 2016).

En ce qui concerne la pluviométrie, celle-ci n'a que peu d'impacts sur le développement de la rouille jaune (Savary et al., 2016). L'humidité, par contre, va influencer la propagation de la maladie. Il faut au moins trois heures d'humidité saturée pour permettre aux urédospores de germer et infecter les tissus (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Le tableau 5 suivant synthétise les conditions environnementales nécessaires au développement de la rouille jaune décrites par Roelfs et al. (1992).

Tableau 5: Conditions environnementales nécessaires au développement la rouille jaune

Conditions environnementales	Température (°C)			Lumière	Eau libre
	Minimum	Optimum	Maximum		
Germination	0	9-13	23	Faible	Essentiel
Tube germinatif	-	10-15	-	Faible	Essentiel
Appressorium³			<i>Non formé</i>		
Pénétration	2	8-13	23	Faible	Essentiel
Croissance	3	12-15	20	Elevé	Non
Sporulation	5	8-13	20	Elevé	Non

Source : Van De Ginste, 2021

D'autres facteurs climatiques vont également influencer le développement de la maladie comme, par exemple, le vent donc le timing et la direction vont jouer un rôle majeur dans la dispersion des spores à la fois sur de courtes et de longues distances et la précocité de l'infection (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017). La rouille jaune présente une très forte capacité de sporulation

Enfin, un certain nombre de facteurs climatiques peut limiter le degré d'infection précoce du champ. Ainsi, des températures élevées en fin d'été vont limiter la quantité d'inoculum primaire en automne. Le gel va aussi avoir un impact sur la propagation de la maladie. En effet, le gel tue le mycélium lorsque celui-ci est en sporulation, la propagation de la maladie durant les hivers rigoureux est alors limitée. Cependant, le gel ne détruit pas le mycélium non-sporulant qui se trouve au sein des tissus de la feuille. En France, si les températures cumulées de décembre à avril sont inférieures à 7°C, il a pu être prouvé que cela diminue l'infection de la rouille jaune au printemps (Gladders, 2007).

Le champignon est généralement inhibé par les températures supérieures à 20°C, même s'il existe des souches tolérant les fortes températures. Le cycle complet de la maladie, de l'infection à la production de nouvelles spores, peut être achevé en sept jours dans des conditions idéales et se répéter de nombreuses fois en une saison.

2.7.2- Facteurs agronomiques influençant le développement de la rouille jaune

Certains facteurs sont associés positivement à la sévérité de l'épidémie de rouille jaune comme : des pluies durant la récolte, la présence de plantes hôtes durant l'inter-culture ou encore des semis tardifs et des hivers doux (Gladders, 2007). Une densité de semis importante et un

excès de fumure azotée vont également favoriser la rouille jaune (Livre Blanc Céréales : Rouille jaune, 2017).

Tableau 6: récapitulatif des paramètres généraux favorisant la rouille jaune sur les céréales

	Facteurs favorables au développement de la maladie	
Météo	Humidité et rayonnement faibles	Vents
	Températures douces	
Itinéraires agronomiques	Semis précoce	Excès d'azote
	Variété sensible	Graminées d'adventices ou repousses contaminées

Source : Van De Ginste, 2021

2.8- Potentialités adaptatives du pathogène et ses interactions avec l'environnement

La rouille jaune du blé sévit dans les régions à climat tempéré, particulièrement dans le Nord-Ouest de l'Europe (De Vallavieille-Pope et al., 2000 ; Hovmøller et al., 2002, Hau et De Vallavieille-Pope, 2006), les hauts plateaux de la Chine (Chen et al., 2002), le Nord des Etats-Unis, l'Asie Centrale et l'Inde ainsi qu'au Moyen Orient (Hakim et Mamluk, 1996) et en Australie (Welling et McIntoch, 1990) depuis la fin des années 1980. Cette maladie est depuis devenue récurrente dans les principales régions céréalières mondiales notamment en Afrique de l'Est et du Sud (Boshoff et al., 2002), au Chili (Becerra et al., 2007) et au Mexique (Solis-Moya et al., 2007). Des épidémies de rouille jaune ont été ainsi reportées sur les 5 continents. L'extension de la maladie à des zones jusque-là indemnes reflète ainsi l'impressionnante capacité du champignon pathogène à muter, migrer sur de longues distances et à s'adapter aux conditions environnementales. Ce champignon présente ainsi des caractéristiques biologiques qui lui procurent un potentiel adaptatif important face aux contraintes de ses environnements biotiques et abiotiques. En effet, *P. striiformis* f.sp. *tritici*, est connu pour sa capacité à muter et à contourner régulièrement les résistances spécifiques introduites par les sélectionneurs dans les variétés cultivées (De Vallavieille-Pope et al., 1990 ; 2000).

2.9- Méthode de lutte contre la rouille jaune

De nombreuses techniques culturales permettent de diminuer la pression de la rouille jaune dans des parcelles de culture de triticale et de blé. Au vu des impacts sur le rendement que peuvent avoir la rouille jaune, il est important de tous les prendre en compte :

- La densité de semis

Le choix de la densité de semis va avoir un impact indirect sur la pression de l'agent pathogène. Plus cette densité sera élevée, plus la densité de population après la levée sera importante. Un couvert végétal dense va favoriser le développement des maladies. En effet, un feuillage fourni permettra à la rouille jaune de passer d'une plante à l'autre plus facilement. Il fournira également une protection face aux UV (Ultra-Violets) qui sera favorable aux rouilles. D'autres parts, une population de plantes de blé condensée va modifier les conditions climatiques au sein de la culture, avec une humidité relative plus importante, qui favorisera le développement des pathogènes (Arvalis, 2015).

- La rotation

Une longue rotation va jouer un rôle important dans la mesure où elle permettra de perturber le cycle de vie du pathogène. Il faut tenir en compte le fait de remplacer une culture (triticale ou blé) par une culture autre que celle présente avant la rotation.

- L'enfouissement et le broyage des résidus

Le travail du sol va permettre de réduire l'impact de la rouille jaune sur les cultures de la prochaine campagne dans la mesure où, l'inoculum de la rouille peut être présent sur les résidus de cultures. Il est donc pertinent de les enfouir ou de les broyer afin de limiter le stock d'inoculum primaire.

- La fertilisation azotée

Il est intéressant de fractionner les apports d'azote afin d'éviter un feuillage trop dense au début du printemps. Cela sera favorable aux maladies pour les mêmes raisons que la densité de population, c'est-à-dire, protection des UV (Ultra-Violets) et augmentation de l'humidité relative dans le feuillage.

- La date de semis

Les semis tardifs vont permettre à la culture d'échapper aux contaminations primaires en automne et ainsi diminuer la pression parasitaire avant le printemps.

- **Lutte génétique**

C'est le levier agronomique, le plus important pour lutter face aux pathogènes du blé et de triticale et aussi l'un des plus économiques pour les agriculteurs. Le choix d'une variété résistante permet de diminuer significativement le risque maladie. Même s'il ne s'agit que de résistances partielles ces variétés restent le meilleur moyen de lutter contre cette maladie. Il faut être vigilant avec la résistance variétale, car elle peut être également contournée. C'est le cas de la race de rouille jaune Warrior, qui contourne les résistances de variétés grâce à ses gènes de virulences (Kolmer, 2013).

- **Lutte chimique**

Même s'il existe de nombreux moyens de lutte culturale contre la rouille jaune et que la résistance variétale permet une forte diminution de la pression parasitaire, la lutte chimique, basée sur l'utilisation de produits phytopharmaceutiques, reste le moyen le plus efficace pour combattre les nombreux pathogènes qui touchent les cultures blé et triticale. Afin de lutter contre la rouille jaune, il existe de très nombreux produits phytosanitaires et des groupes de matières actives ayant chacun des modes actions différents : Les strobilurines (ou QoI), Les Inhibiteurs de Méthylation (ID M), Les Multisites.

2.10- Modèle de météorologique de prédiction de la rouille jaune

2.10.1- Modélisation

Un modèle est « une formulation simplifiée qui imite les phénomènes du monde réel de telle sorte qu'il nous permet de comprendre des situations complexes et de faire des prévisions. Un modèle de maladie végétale quant à lui est une simplification des relations entre le pathogène, la plante hôte et l'environnement qui vont déterminer la façon dont une épidémie va se développer dans le temps et dans l'espace. Dans leur forme la plus simple, les modèles peuvent être verbaux ou graphiques, c'est-à-dire être faits d'énoncés concis ou de représentations picturales » (Odum, 1975) in (Gate, 1995). La modélisation se déroule en plusieurs étapes : définition de l'objectif du modèle, conceptualisation, développement des relations mathématiques et l'évaluation du modèle (Rossi et al., 2010). Un modèle peut s'exprimer sous la forme mathématique simple suivante (Minet & Tychon, n.d.) :

$$\text{Equation : } Y=M(x,p)$$

Où Y représente la (les) variable(s) expliquée(s) par le modèle (la variable de sortie) ; X la ou les entrées du modèle et p les paramètres du modèle (Minet & Tychon, n.d.). Les variables d'entrée sont les variables observées ou mesurées et qui se retrouvent dans toutes les situations où le modèle est appliqué. Pour des modèles de prédiction des maladies, il peut s'agir des données météorologiques, des caractéristiques liées à la pratique culturale (date de semis, dates et doses d'apport de fertilisant) et à la maladie. Les paramètres du modèle sont des valeurs qui sont constantes pour toutes les situations étudiées. (Raphaël Delattre, 2017).

Les modèles utilisés dans le cadre de la lutte contre la maladie fongique, permettent de simplifier les relations entre les agents pathogènes, les plantes hôtes et l'environnement, et déterminent comment les épidémies évoluent dans le temps et dans l'espace.

2.10.2- Types de modèles

Il existe différents types de modèles. Cependant, un modèle peut être empirique ou épidémiologique (mécanique), déterministe ou probabiliste et statique ou dynamique (Prandini et al., 2009).

Il existe différents types de modèles. Parmi ceux-ci, deux types ont été retenus :

- Les modèles statistiques : Construits à partir des lois statistiques, ces modèles sont basés sur des relations comme par exemple la régression à une ou plusieurs variables explicatives. Ils sont simples d'utilisation et permettent d'identifier rapidement les variables explicatives les plus déterminantes (Gate, 1995 *in* Raphael Delattre, 2017).
- Les modèles mécanistes : Ces modèles sont plus complexes car ils intègrent les principaux processus intervenant dans le système étudié (El Hassani & Persoons, 1994). Par exemple, pour les modèles utilisés pour la prédiction, le but est d'avertir sur le moment auquel peut surgir et les conditions nécessaires favorisant l'apparition de la maladie. Ils sont basés sur des lois et des fonctions physiologiques connues. Différentes données d'entrée viennent alimenter ces modèles : données d'origine interne concernant les propriétés des plantes (génétique, etc.) et des données d'origine externe (données météorologiques, pédologiques, ...) (Gate, 1995; Rauff & Bello, 2015). La principale difficulté de ces modèles est leur validation (El Hassani & Persoons, 1994).

NB : Dans le cadre de notre étude, nous travaillerons sur un modèle mécaniste développé par Moussa Jarroudi en 2017.

2.10.3- Modélisation comme outil d'aide à la décision

Une décision peut être prise pour répondre à des types de questions différents. Il s'agit de questions à caractère tactique qui sont posées à court terme ou de questions à caractère stratégique qui sont posées sur le long terme (Dubrulle et al., 2014). Face à ce système complexe et ces nombreuses interrogations, l'acteur doit pouvoir se référer à certains éléments d'information qui vont lui servir d'aide lors de la prise de décision. Ces outils peuvent avoir plusieurs formes : il peut s'agir de guides, de référentiels, de logiciels, de la mise en place de réseaux, de démarches d'accompagnement des agriculteurs dans leur réflexion par des techniciens, ... (Dubrulle et al., 2014). Le schéma suivant (figure 6) reprend la façon dont les outils peuvent être utilisés. Ceux-ci sont créés après la conception et le développement de modèles par les scientifiques. Il est possible de les utiliser de deux manières : soit ils sont directement utilisés par l'agriculteur qui prend alors, en fonction de l'aide reçue par l'outil, une décision ; soit l'utilisateur direct est un acteur jouant un rôle de fournisseurs de services. Ceux-ci analysent et interprètent les résultats fournis par l'outil et donnent des conseils à l'agriculteur qui de toute manière reste le destinataire final (Dubrulle et al., 2014). Les concepteurs d'un outil devront dès le départ connaître les utilisateurs directs, les destinataires finaux et leurs objectifs. En effet, cela leur permettra de définir correctement les caractéristiques opérationnelles de leur outil (Dubrulle et al., 2014).

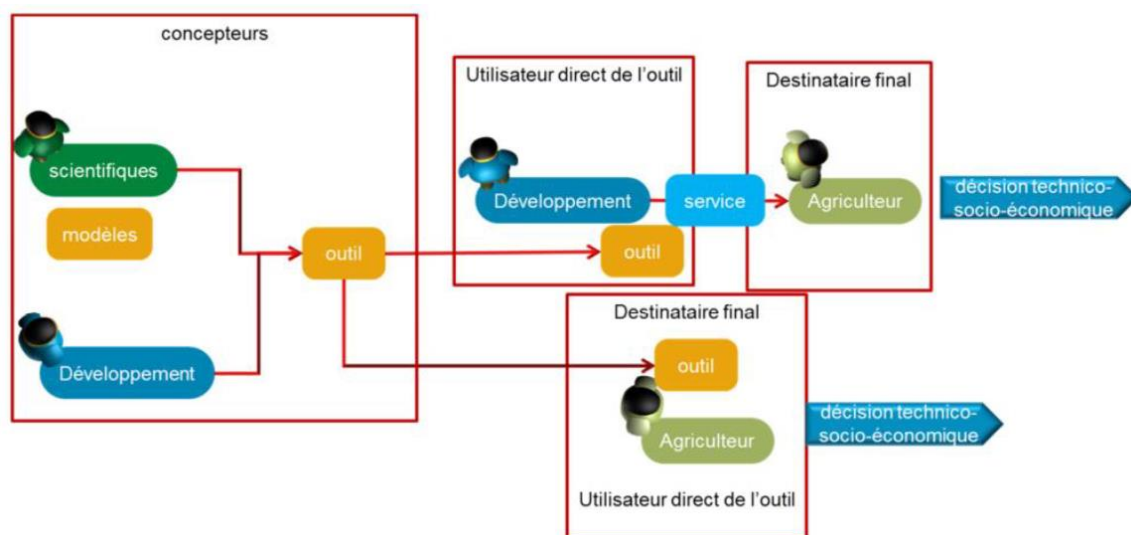


Figure 6: Les outils d'aide à la décision, de la recherche aux agriculteurs (Dubrulle et al., 2014)

Depuis de nombreuses années, les modèles de culture sont développés par de nombreux scientifiques et sont devenus des outils indispensables pour les agriculteurs. Ils permettent notamment de comprendre et prédire le développement des cultures. Cela est essentiel afin d'optimiser des applications comme les traitements chimiques, les engrais ou encore l'irrigation (Bogard et al., 2015; M El Jarroudi et al., 2011; McMaster & Wilhelm, 2003).

La production de céréales de qualité avec un minimum d'intrants chimiques est devenue un des enjeux majeurs actuels de l'agriculture. Cela est bénéfique d'un point de vue économique (réduction du coût de l'application de pesticides) mais également d'un point de vue environnemental soumis aux fortes pressions de l'opinion publique. Il est donc intéressant de diminuer les doses de traitements appliquées sur les cultures sans pour autant augmenter les risques de dégâts causés par les maladies. Pour ce faire, il faudra trouver un juste milieu (El Jarroudi et al., 2011).

Dans la partie suivante, nous allons présenter et développer les caractéristiques de quelques outils d'aide à la décision.

CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES

3.1 Description de la zone d'étude

3.1.1 Choix et localisation du site expérimental

Les données de cette étude ont été collectées dans la localité de Bettendorf sur les parcelles expérimentales du Lycée Technique d'Ettelbruck, dans le cadre du projet sentinelle 5 (porté par l'Université de Liège et la *Luxembourg Institute of Science and Technology*). Ayant pour coordonnées géographiques : 49°52' 55" Nord et 6°13' 19" Est, Il s'agit de l'un des sites choisis par EL Jarroudi lors de son étude en 2005 grâce à la collaboration de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA), du CRP-Gabriel Lippmann et surtout du Lycée Technique Agricole d'Ettelbrück ; car faisant partie des principales régions céréalières du Grand-Duché de Luxembourg ayant la particularité d'avoir les grandes variations topo climatologiques.

Bettendorf, est une ville luxembourgeoise qui est le chef-lieu de la commune portant le même nom, située dans le canton Diekirch, dans la partie Est du Luxembourg, dans la vallée étendue de la Sûre, partiellement dans le parc naturel belgo-luxembourgeois, a toujours bénéficié d'un climat particulièrement agréable, qui a permis le développement d'une agriculture prospère. La qualité du sol et la situation géographique idéale expliquent pourquoi Bettendorf figure parmi les plus anciens sites habités du Luxembourg.



Figure 7: Image du site de Bettendorf (Issam Melki, 2022)

3.1.2 Caractéristiques météorologiques

Le climat du Luxembourg est de type océanique tempéré, avec des précipitations relativement abondantes tout au long de l'année. Les températures sont modérées, avec des étés frais et des hivers doux. La proximité de l'océan Atlantique et la position du pays entre les zones de haute et de basse pression ont une influence significative sur le climat luxembourgeois. Les vents dominants soufflent du sud-ouest, apportant de l'air chaud et humide en été et de l'air froid et sec en hiver. Les précipitations sont généralement plus élevées dans l'Ouest et le Nord du pays, avec une moyenne annuelle d'environ 800 à 900 mm, tandis que les régions Sud et Est sont plus sèches, avec une moyenne annuelle d'environ 600 à 700 mm. Les mois les plus humides sont juin et juillet, tandis que les mois les plus secs sont février et mars.

Les hivers doux et des étés frais. Les températures moyennes en hiver oscillent entre 0°C et 6°C, tandis que les températures moyennes en été varient entre 16°C et 22°C. Les températures les plus élevées sont généralement enregistrées en juillet et août, tandis que les températures les plus basses sont enregistrées en janvier et février. Les précipitations sont réparties tout au long de l'année, avec des niveaux de pluie assez élevées en automne et en hiver.



Figure 8: Diagramme ombrothermique du Luxembourg (climate data.org luxembourg.)

Juillet est le mois le plus chaud de l'année. La température moyenne est de 18.2 °C à cette période. Au mois de janvier, la température moyenne est de 1.6 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année comme le présente la figure 8 ci-dessus.

Une différence de 31 mm est enregistrée entre le mois le plus sec et le mois le plus humide. La température moyenne au court de l'année varie de 16.6 °C. Le mois avec l'humidité relative la plus élevée est Novembre (88.38 %). Le mois où le taux d'humidité relative est le plus bas est Juillet (69.48 %). Le mois avec le plus grand nombre de jours de pluie est décembre. Le mois avec le nombre le plus bas est septembre (9.80 jours) suivant le tableau 7.

Tableau 7 : Tableau climatique du Luxembourg

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	1.6	2	5.2	9	13	16.3	18.2	17.7	14.3	10.4	5.7	2.5
Température minimale moyenne (°C)	-0.8	-1	1.1	4.1	8.3	11.4	13.5	13.2	10.2	7.1	3.2	0.3
Température maximale (°C)	4	5.3	9.3	13.5	17.1	20.6	22.4	22.1	18.5	13.9	8.3	4.8
Précipitations (mm)	74	62	63	58	71	67	64	68	64	72	76	89
Humidité(%)	86%	83%	78%	72%	73%	71%	69%	71%	76%	82%	88%	88%
Jours de pluie (jrée)	9	8	9	8	9	8	9	8	7	9	10	11
Heures de soleil (h)	2.5	3.7	5.7	8.3	9.0	10.1	10.3	9.1	6.8	4.6	2.8	2.4

Source : climate data.org luxembourg

3.1.3 Caractéristiques édaphiques

Les sols Luxembourgeois se caractérisent par leur diversité, en raison des différences géologiques et des variations topographiques. Les sols peuvent être divisés en plusieurs types, notamment les sols limoneux, les sols sableux, les sols argileux et les sols calcaires. Les sols limoneux sont généralement considérés comme les plus fertiles, car ils sont riches en nutriments et en matière organique. Les sols sableux, en revanche, sont moins fertiles car ils sont moins capables de retenir l'eau et les nutriments. Les sols argileux sont également riches en nutriments, mais ils sont souvent lourds et difficiles à travailler. Les sols calcaires sont généralement alcalins et peuvent être riches en calcium et en magnésium. Dans l'ensemble, les sols ont un potentiel agricole important pour la culture des céréales et d'autres cultures, bien que leur qualité puisse varier considérablement en fonction de leur composition et de leur drainage. Les agriculteurs

doivent donc prendre en compte ces variations lorsqu'ils choisissent les cultures à cultiver et les méthodes de gestion des sols à utiliser.

3.1.4 Végétation, faune et flore

La végétation est caractérisée par une forêt dense et un relief vallonné. On y trouve une grande diversité de flore et de faune. En termes de flore, la région de l'Oesling est principalement couverte de forêts, avec des essences telles que le chêne, le hêtre, le pin et le sapin. Il y a aussi des prairies et des pâturages dans les vallées et les collines. Les plantes typiques de ces zones comprennent le trèfle, le pissenlit, la marguerite et la camomille. Du point de vue de la faune, on y retrouve des espèces telles que le cerf, le chevreuil, le renard, le blaireau, la belette et le lièvre. On peut également trouver des oiseaux tels que le faucon pèlerin, la buse variable, le hibou grand-duc et la grive musicienne. En général, le pays est caractérisé par une grande diversité de flore et de faune, ce qui en fait un lieu d'intérêt pour les amoureux de la nature et les scientifiques qui étudient la biodiversité.

3.2- Approche méthodologique

Cette partie concerne la méthode adoptée pour la caractérisation de la rouille jaune sur le triticales et le blé. Cette description retrace la méthodologie adoptée par les étudiants ayant collectés les données sur la maladie en 2020 qui est l'année où un fort taux de propagation de la maladie a été observé.

3.2.1- Détermination des stades phénologiques

Nous prélevons un échantillon de la culture pour déterminer son stade de développement. Pour cela, nous choisissons aléatoirement dix plants sur l'ensemble de la parcelle et les marquons à l'aide d'un piquet et d'une attache. Chaque jour de collecte, nous relevons les informations sur le même plant. Nous choisissons les plants en fonction de leur diamètre, en évitant les plants trop petits qui risquaient de mourir pendant la période de collecte.

3.2.2- Cotation de la maladie

Une fois le stade déterminé, les plantes ont été décortiquées afin de séparer toutes les feuilles. Les feuilles de chaque plante étaient numérotées en partant de la feuille la plus récente à la plus ancienne. Cette technique permet de déterminer quelle feuille est atteinte même si la totalité des feuilles n'a pas encore émergé. La sévérité, définie comme étant la proportion de la feuille touchée par la maladie (Savary et al., 2015), a été déterminée sur chaque feuille

séparément en se basant sur l'échelle de détermination de Cobb pour de la rouille jaune, celle-ci prenait en compte l'intégralité de la tache brunâtre, y compris les zones sans pycnides. Ces parcelles étaient d'environ 12 m² (soit 8 m x 1,5 m environ), chacune séparée l'une de l'autre par un désherbant. Chaque parcelle était identifiée par le nom de la localité, de la culture, de la variété et du type de parcelle en fonction qu'il s'agisse d'une parcelle de contrôle, de traitement ou modèle. Sauf que les données récoltées ont été faites sur les parcelles de contrôle.

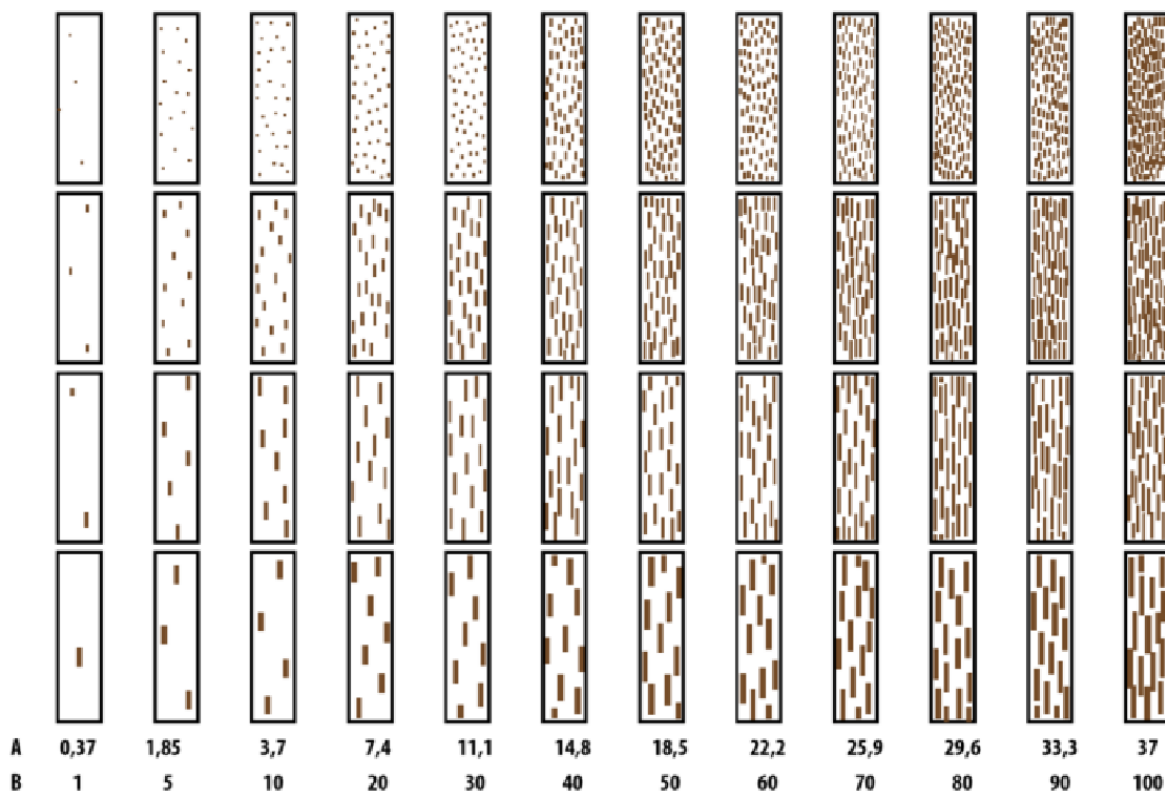


Figure 9: Echelle de la sévérité de la rouille (Koyshibayev et Muminjanov, 2016 *in* Remi Meurs)

3.3- Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont celles de la station de Bettendorf gérées et entretenues par l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) du Luxembourg. Il s'agit des données collectées pour l'année 2020 car c'est l'année pendant laquelle il a été constaté une importante propagation de la maladie dans le champ expérimental. Les conditions météorologiques seront discutées dans le point résultat et discussion. La station

mesure les conditions microclimatiques du champ et les analyses. La station mesure les conditions microclimatiques et nous renseigne notamment sur la température de l'air et l'humidité relative de l'air ainsi que la pluviométrie. Ces paramètres sont enregistrés toutes les heures. Ces données alimenteront un modèle qui calcule en temps réel le risque d'infection du champ pour la rouille jaune. Ces risques d'infections ont été utilisés afin de déterminer quand l'infection a eu lieu sur les différentes spéculations étudiées.

3.4- Traitement des données

Nous avons tout d'abord sélectionné une période pour laquelle des mesures ont été faites. Cette période a été celle plus propice aux infections par la rouille.

Le logiciel Excel est celui qui nous a permis de traiter nos données à l'aide des tableaux croisés dynamiques sur la base desquels, nous avons pu ressortir des histogrammes présentant la caractérisation de la maladie, la caractérisation des conditions météorologiques, la détermination des conditions météorologiques favorables au développement de la rouille jaune sur triticales. Grâce au test d'ANOVA, nous avons pu établir les relations entre les variétés, le stade de développement et l'évolution de la maladie.

Ensuite, les données météorologiques de cette période (2020) ont été requises pour le modèle. Le modèle choisi décrit plutôt une approche axée sur les conditions climatiques qui vont permettre l'infection d'une unique feuille. Les différentes étapes schématisant les opérations sont reprises sur la figure 10 :

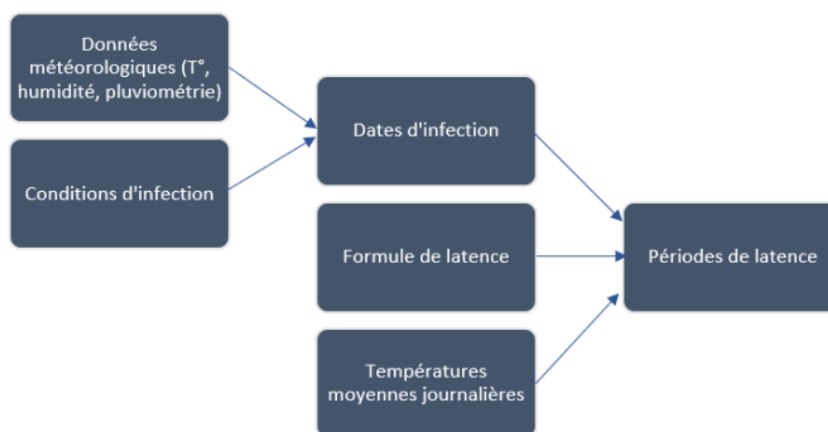


Figure 10: étapes du modèle de prédiction de la rouille

Tout d'abord, pour que le champignon se développe, il a besoin de conditions climatiques favorables. Ces conditions sont la combinaison de température, d'humidité relative et de précipitations optimales qui vont permettre une potentielle infection des feuilles par les spores de rouille jaune ; et ceux durant une durée minimum définie, sans quoi les spores ne pourront se développer.

Nous nous sommes basés sur les résultats de la prédiction de la rouille jaune sur le blé d'hiver au Luxembourg obtenus par Moussa 2017 pour tester si le modèle utilisé pour le blé marchera pour le triticale. Cette analyse dépend de la période d'infection la plus critique.

Ensuite, nous avons déterminé la période de latence dès le début de l'infection potentielle. Elle dépend de la température et sa fin correspond à l'infection et l'augmentation de la surface foliaire infectée par la rouille.

Pour valider le modèle, nous avons fait une correspondance ou une superposition entre les dates où il y'a eu l'infection et les dates des observations des symptômes de la rouille jaune.

a)- Conditions de l'infection

Les conditions d'infection, reprises dans le tableau 8, sont issues pour la rouille jaune de l'article d'El Jarroudi et al. (2017). Dans le logiciel Excel, une colonne supplémentaire sera créée pour chaque paramètre. Si chaque paramètre remplit les conditions citées précédemment, une valeur de 1 sera indiquée dans le tableau et 0 si la condition n'est pas remplie.

Tableau 7: Paramètres utilisés dans la prédiction de la rouille jaune

Paramètres	Rouille jaune
Durée de l'infection	4h
température	$4^{\circ}\text{C} \leq \text{températures} \leq 16^{\circ}\text{c}$
Humidité relative minimale	92%
Condition pluviométrique	Pluviométrie horaire durant la drée d'infection < 0,1mm
Seuil de lessivage	Pluviométrie $\geq 1\text{mm}$

Source : El Jarroudi, 2017

Les conditions reprises dans le tableau 8 ci-dessous sont celles nous ayant permis de base pour le calcul des latences dans la mesure de voir si comme elles étaient favorables dans le cadre du blé, elles le seront aussi pour le triticale.

b)- Période de latence.

La période de latence n'est dépendante que de la température moyenne et est inversement proportionnelle à celle-ci. La formule de calcul de latence pour la rouille jaune est la suivante :

$$\text{Rouille jaune : } L(j) = (1005 + 11,3 * T_{\text{moy}}) / (2,5 + 5,65 * T_{\text{moy}}) \text{ (Jarroudi, 2017)}$$

Chaque jour, cette latence pourra prendre des valeurs différentes. La surface foliaire infectée commencera à augmenter lorsque la somme de l'inverse de cette latence atteint la valeur de 1. L'inverse de la latence est donc obtenu avec la formule :

$$\text{Inverse de la latence} = 1/L$$

Où L = latence calculée précédemment

Chaque période de latence sera ensuite comptabilisée dans un tableau en fonction des dates d'observation. Ainsi, les symptômes observés pourront être comparés aux phases de latence obtenues par le modèle. À la fin de la latence un évènement infectieux a été simulé.

Après le calcul de la latence, nous avons utilisé les données de la toute la période culturale pour la validation du modèle. Nous avons fait une superposition entre les données observées et données simulées afin d'en sortir les différentes probabilités qui serviront pour la validation du modèle pour la prédiction de la rouille jaune sur le triticale. La capacité du modèle météorologique basé sur les seuils à prédire correctement les évènements d'infection par *P.Striiformis* à l'échelle de Bettendorf. La performance du modèle a été évaluée sur la base d'une analyse des tableaux de contingence de la probabilité de détection (POD), le taux d'infection, le taux de fausses alarmes (FAR) et l'indice de réussite critique (CSI). Ils ont été calculés de la manière suivante : $POD = a/(a+c)$; $FAR = b/(b+a)$; $CSI = a/(a+b+c)$; où a, b et c se réfèrent aux infections observées et simulées, aux infections simulées mais non observées et aux infections observées mais non simulées respectivement (Crown 2012, El Jarouddi et al 2009, Mahtour et al 2011 in El Jarouddi 2017).

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. RESULTATS

4.1.1- Caractérisation de la rouille jaune sur le triticale

a)- Surface foliaire

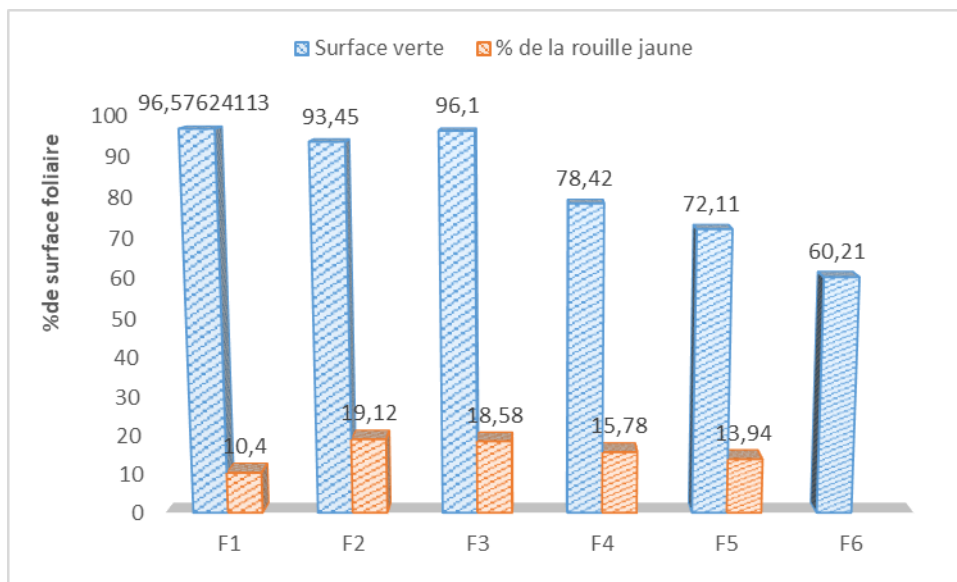


Figure 11: Comparaison des surfaces foliaires vertes et celles attaquées

Bien que les surfaces vertes aient un pourcentage plus élevé que celui des parties attaquées, il reste tout au moins vrai que la maladie est présente dans les parcelles étudiées avec une prédominance de symptômes pour les feuilles F2, F3 et F4 respectivement.

b)- Pourcentage de surface des feuille attaquées

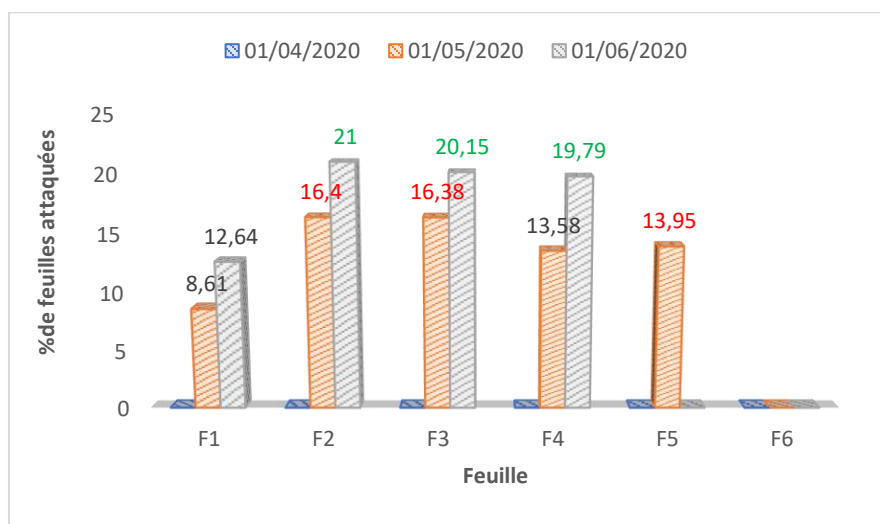


Figure 12: Evolution des symptômes sur le triticale

La figure suivante présente le pourcentage des feuilles attaquées par la rouille jaune sur le triticale pour l'ensemble des parcelles et répétitions. Nous pouvons constater qu'il n'y'avait pas de symptômes au mois d'Avril 2020 sur l'ensemble des feuilles. Pour ce qui est du mois de Mai, les feuilles F2, F3, F5 sont les plus attaquées avec respectivement des pourcentages de 16,4 % ; 16,38 % et 13,95 %. C'est la même situation pour le mois de Juin.

c)- Influence de la variété sur la sévérité de la rouille jaune sur triticale

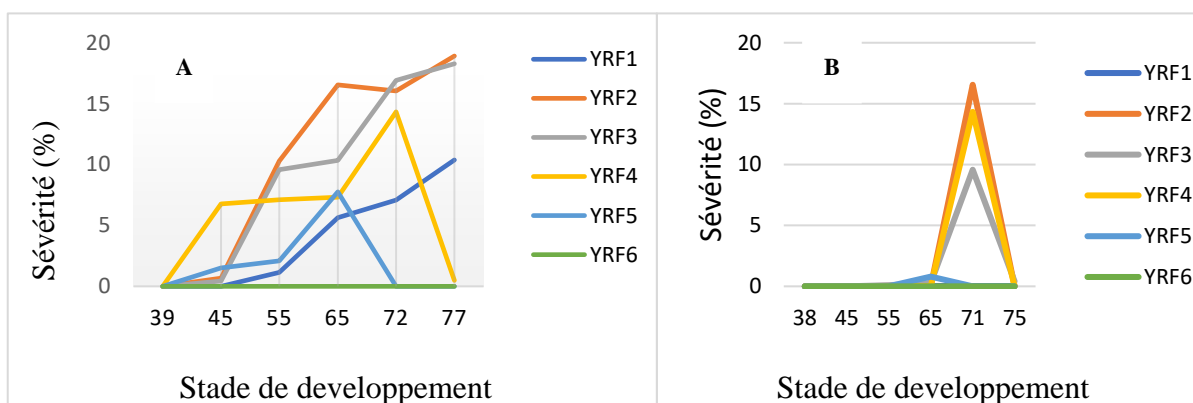


Figure 13: Evolution de la sévérité de la maladie en fonction des stades de développement de la variété Lombardo (A) et Kasyno (B) et par étage foliaire (YRF1 à YRF6)

Cette figure nous montre comment évolue la rouille en fonction de la variété. Les données collectées nous montraient que les plants de la variété Kasyno étaient moins touchés que les

plants de la variété Lombardo, ce qui nous a amené à faire un test d'ANOVA pour confirmer notre hypothèse. Les résultats de ce test sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 8 : ANOVA de la sévérité en fonction des variétés

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrées	Carrées moyen	F	P>F
Variété	1	301,52	301,522	10,821	0,0015 **
Erreur	70	1950,53	27,865	/	/
Total	71		/	/	/

Seuils de signification : * : 0,05 ; ** : 0,01.

La valeur de P étant inférieure à ($P < \alpha$) et supérieur au F théorique ($P > F$), nous avons pu conclure que le degré de significativité est élevé donc il y'a une influence de la variété sur la sévérité de la maladie.

En faisant une estimation globale de la sévérité de la maladie en fonction de la variété, nous avons le résultat suivant :

Tableau 9: Comparaison de la sévérité présente sur chaque variété

Variable	Variété	
	Lombargo	Kasyno
Sévérité (%)	5,26±3,86 a	1,17±2,38 b

D'après ce résultat, nous pouvons constater que la variété Lombardo est plus attaquée par la rouille jaune comparée à la variété Kasyno.

d)- Evolution de la rouille jaune sur triticale en fonction du stade de développement

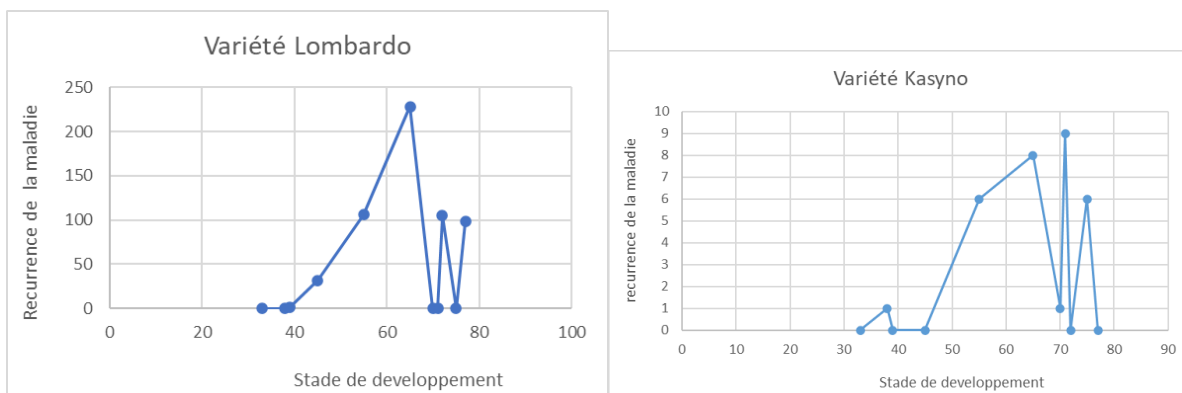


Figure 14: Evolution de la rouille en fonction du stade de développement

La figure 14 présente l'évolution de la rouille en fonction du stade de développement ; cette analyse a été basée sur le nombre de fois que la maladie apparaissait à un stade de développement.

Tableau 10: ANOVA de la sévérité en fonction du stade de développement de la variété Kasyno

Source de variation	de	Degré de liberté	Somme des carrées	Carrées moyen	F	P>F
Stade de développement	de	5	384,32	76,864	2,2084	0,039*
Erreur		30	1044,17	34,806	/	/
Total		35	1428,49	/	/	/

Seuils de signification : * : 0,05 ; ** : 0,01.

Tableau 11: ANOVA de la sévérité en fonction du stade de développement de la variété Lombardo

Source de variation	de	Degré de liberté	Somme des carrées	Carrées moyen	F	P>F
Stade de développement	de	5	223,66	44,731	4,4974	0,0035**
Erreur		30	298,38	9,946	/	/
Total		35	/	/	/	/

Seuils de signification : * : 0,05 ; ** : 0,01.

D'après l'analyse de la variance, le stade de développement a un effet positif (significatif) sur l'apparition de la maladie tant pour la variété Kasyno (P=0,0035) que pour la variété Lombardo (P=0,039).

Tableau 12 : Comparaison de la sévérité des stades de développement de la variété Lombardo

Variable	Stade de development					
	39	45	55	65	72	77
Sévérité (%)	0,00	1,65	6,04	8,68	7,68	7,53

Tableau 13: Comparaison de la sévérité des stades de développement de la variété Kasyno

Variable	Stade de development					
	38	45	55	65	71	75
Sévérité (%)	0,00	0,00	0,033	0,19	6,74	0,07

Ainsi, d'après les tableaux 13 et 14, nous pouvons dire, plus la culture croit plus la propagation de la maladie augmente avec un pic au stade 65 pour la variété Lombardo et 71 pour la variété Kasyno. Ces résultats nous ont amené à faire une analyse de variance afin de confirmer nos interprétations.

d)- Calcul des latences

Pour se faire, nous nous sommes appuyés sur les conditions présentées par Moussa EL dans son article publié en 2017 pour la prédiction de la rouille jaune sur le blé basé sur un modèle météorologique. Les résultats de cette étude révélèrent que les conditions doivent être maintenues sur une durée de 8 heures propices au développement de la rouille étaient les suivantes :

- $4^{\circ}\text{C} \leq \text{températures} \leq 16^{\circ}\text{C}$
- Humidité relative $> 92\%$, l'humidité ne devrait pas également être en deçà de 60% pendant ces 8h
- Précipitation $< 0,1\text{mm}$; cette condition pluviométrique n'est valable que pour la première heure.

D'après nos analyses, un total de 33 infections de la rouille jaune a été détecté sur le triticale entre mai et juin 2020. Il a également été constaté que quand bien même les conditions d'infection étaient réunies, les symptômes de la maladie n'ont pas été perçus et vice versa.

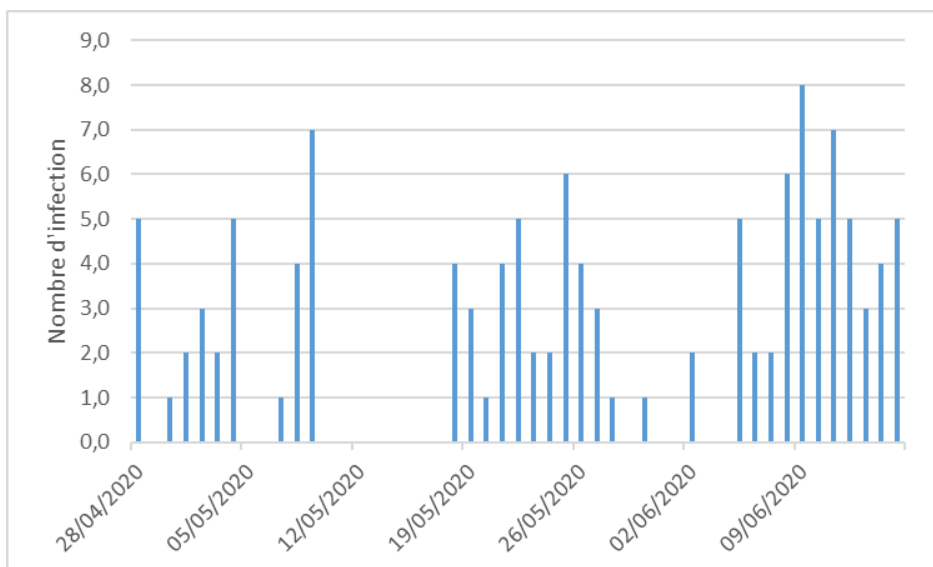


Figure 15: Nombre d'infections pendant la période culturale

La figure 15 fait référence au nombre de plants présentant des symptômes de la rouille ayant pu être constaté sur le terrain pendant la période de collecte. Nous pouvons constater que la manifestation des symptômes ne se fait pas suivant un gradient précis ; néanmoins le pic reste pendant la période de juin 2020.

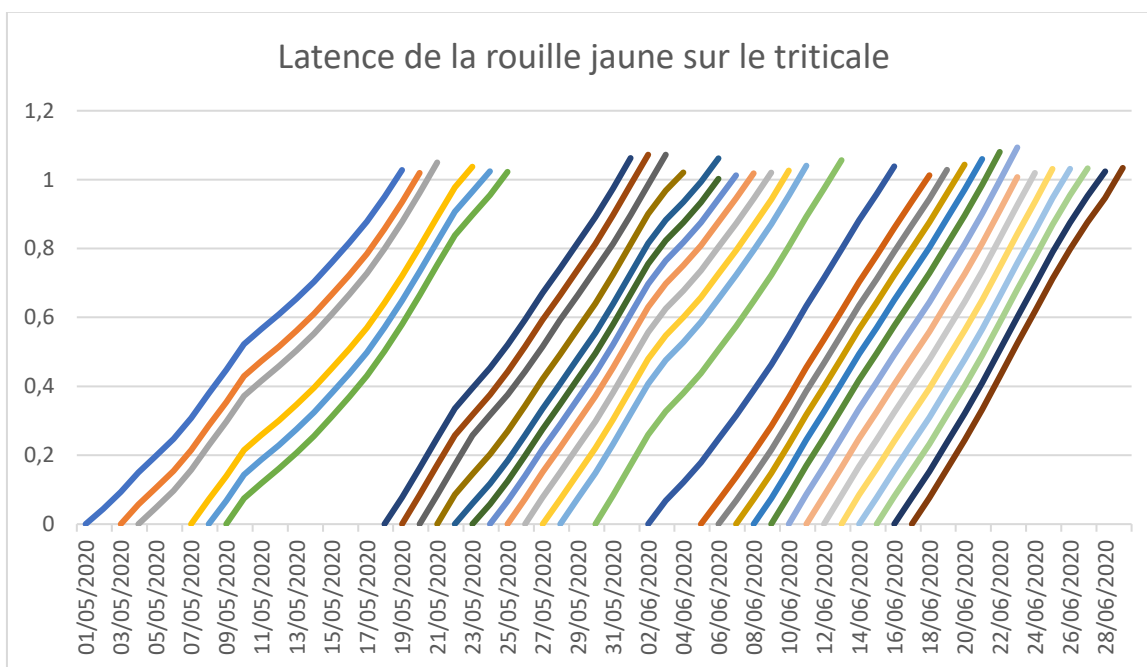


Figure 16: Courbe des latences obtenues à partir des valeurs journalières de la température moyenne de l'air (°C), de l'humidité relative (%), et de la pluie (mm) mesurée à Bettendorf,

La simulation du risque d'infection de la rouille jaune sur le triticale a été effectuée en 2023 pour les données de l'année 2020 à Bettendorf pour les variétés Lombardo et Kasyno. Il est à préciser que les courbes de la latence démarrent au moment de l'infection et le sommet de la courbe représente le moment d'apparition de symptômes. À cet effet, la première infection apparaît entre le 17 et le 18 du mois de Mai 2020.

Les courbes de latence nous ont permis d'élaborer le tableau de contingence suivant :

POD	FAR	CSI
0,71	0,13	0,64

Tableau 14: tableau de contingence de prédiction de la rouille jaune sur le triticale

La probabilité de détection POD est la probabilité de prévoir correctement un évènement observé. Elle est comprise entre 0 et 1. Un score parfait = 1.

FAR : taux de fausses alarmes, est le nombre de fois où un évènement est produit mais n'est pas observé, divisé par le nombre total de prévisions de cet évènement. Un score parfait = 0.

CSI, indice de réussite critique prend en compte les fausses alarmes et les évènements manqués (entre 0 et 1). Score parfait = 1

D'après le tableau 14 nous constatons que la probabilité de détection et indice de réussite sont au-dessus de la moyenne dans les conditions utilisées dans la validation du modèle utilisé pour la prédiction de la rouille jaune sur le blé.

Un test a été réalisé pour déterminer les conditions exactes d'apparition de la rouille sur triticale et les résultats sont repris dans le tableau suivant :

Tableau 15 : comparaison de la précipitation, l'humidité relative et de la température en présence et en absence de l'infection

Eléments du climat	Mois	Infection	
		Présent	Absent
Précipitation (mm)	Avril	0,07±0,02 a	0,08±0,05 a
	Mai	0,01±0,01 a	0,06±0,03 a
	Juin	0,40±0,03 a	0,31±0,22 a
Humidité relative (%)	Avril	84,24±11,07 a	56,86±26,00 b
	Mai	74,83±24,20 a	65,94±23,02 b
	Juin	80,39±19,06 a	72,58±21,41 b
Température (°C)	Avril	11,40±3,09 a	12,62±6,25 a
	Mai	13,55±6,62 a	12,29±6,38 a
	Juin	14,23±5,00 b	16,85±5,34 a

Le Tableau 15 présente la comparaison de la précipitation, de l'humidité relative et de la température en présence et en absence de l'infection. Le test de Student ainsi réalisé montre que les précipitations en présence de l'infection ne sont pas différentes des précipitations en absence de l'infection. A contrario, lorsque l'humidité relative augmente quel que soit le mois, il y'a infection. Par ailleurs, la diminution de la température au cours de juin a favorisé l'infection.

4.1.2- Caractérisation de la rouille jaune sur le blé

Pour ce qui est du blé, nous avons fait des analyses sur deux variétés : la variété Kerubino et la variété Desamo.

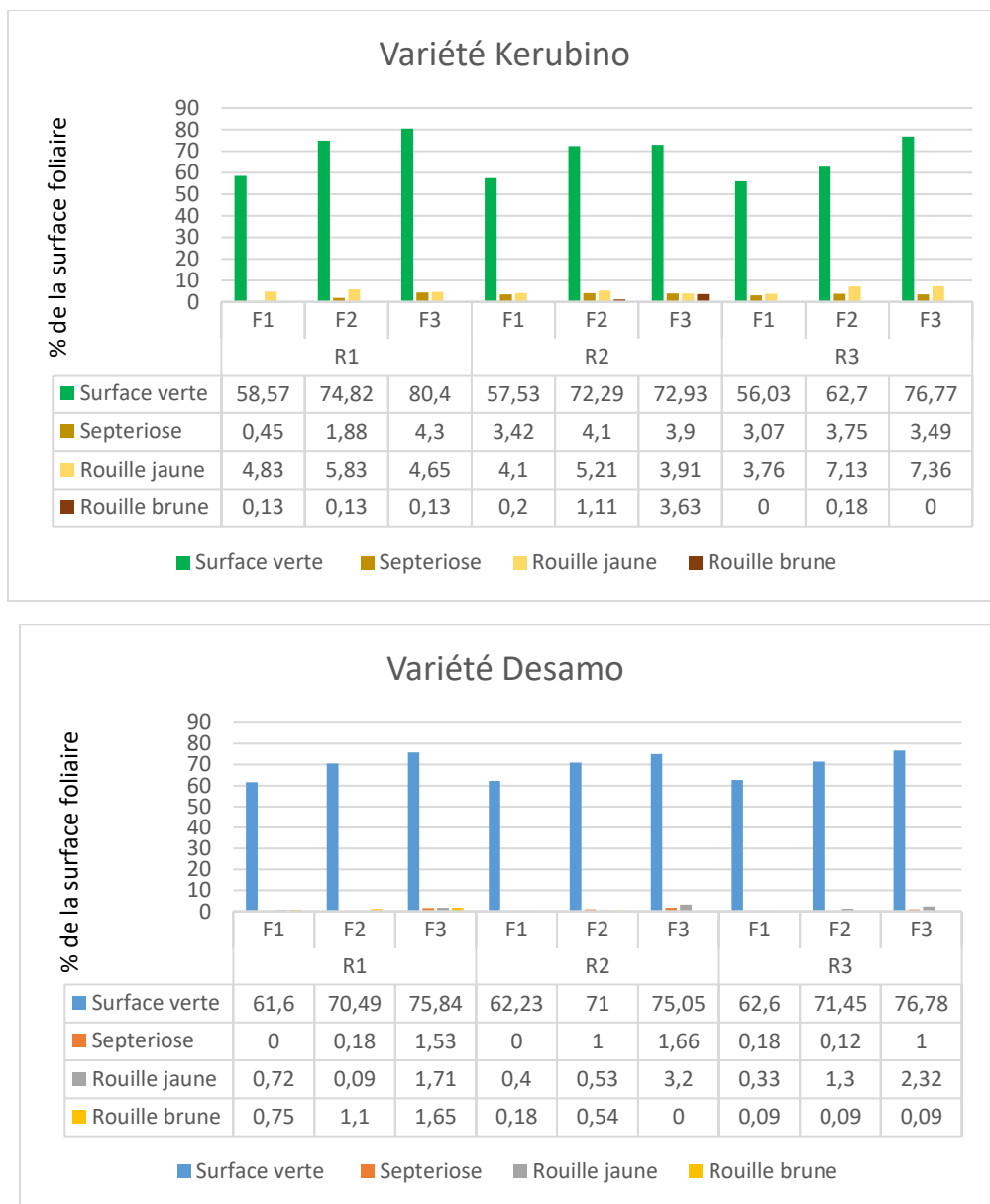
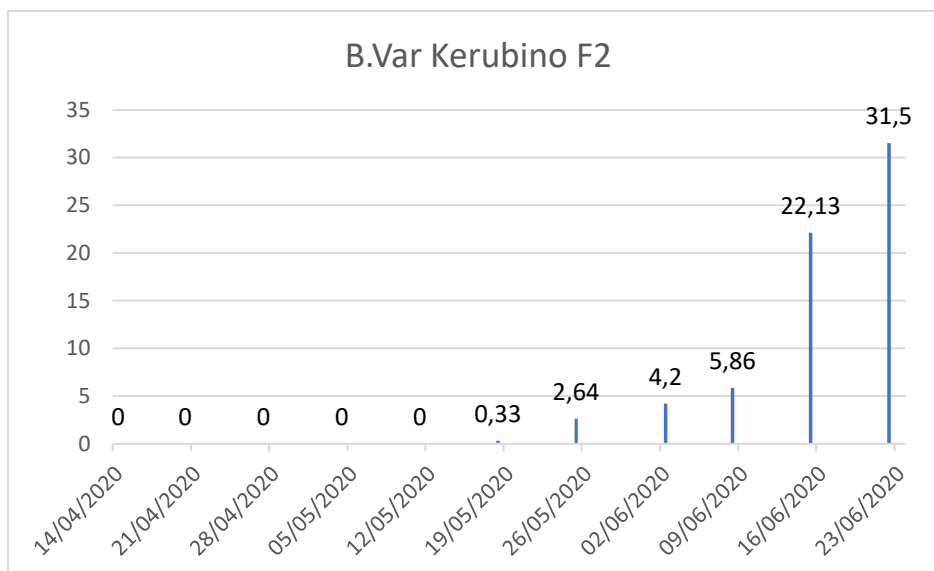
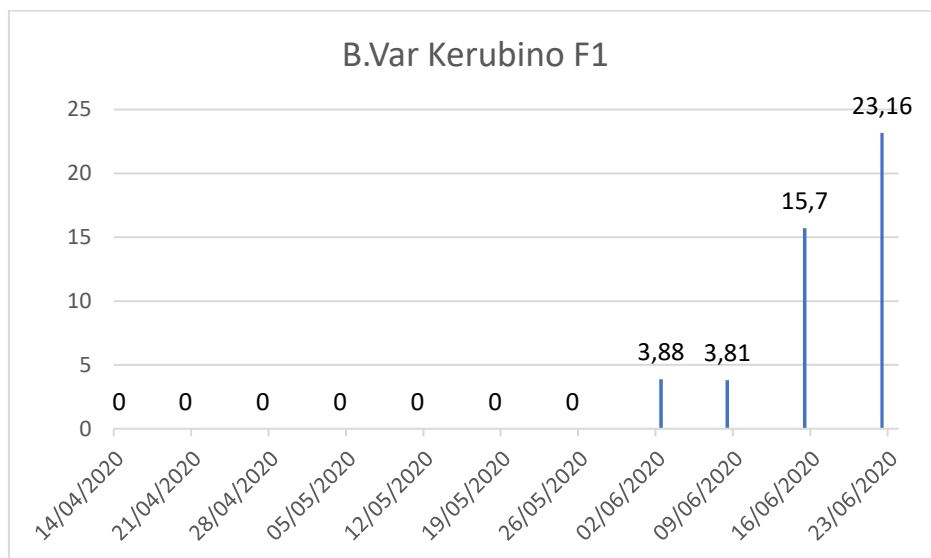
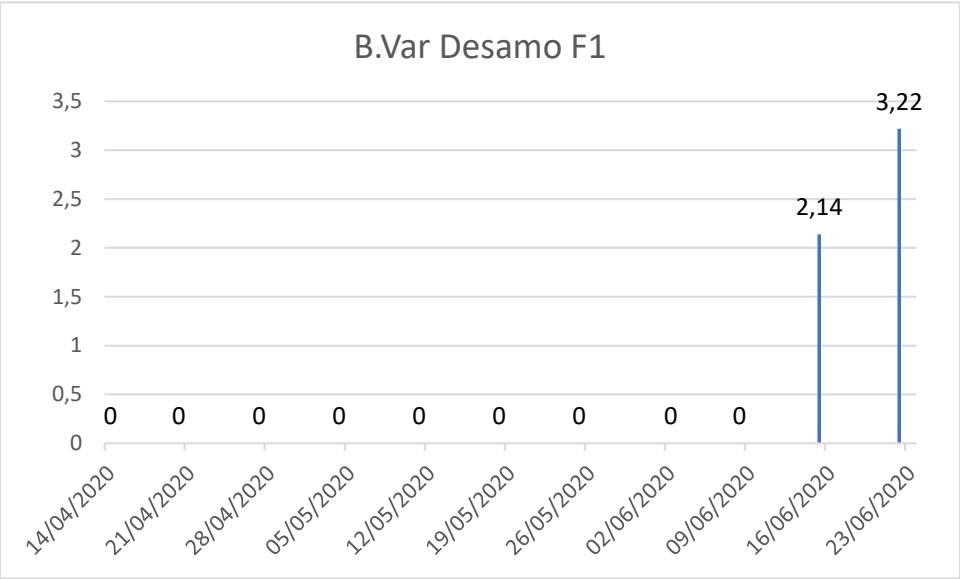
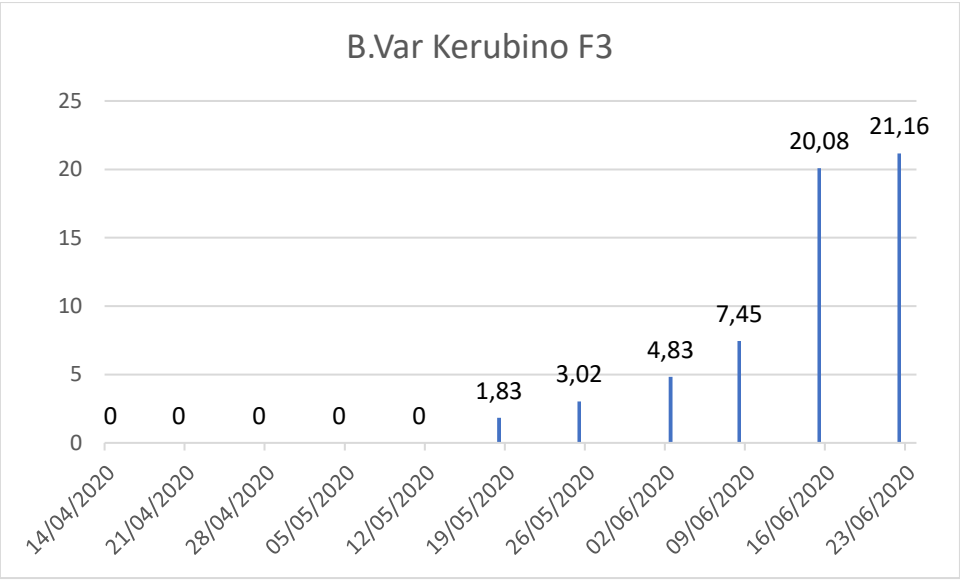


Figure 16: Pourcentage de la surface foliaire atteinte par les maladies cryptogamiques sur blé d’hiver à Bettendorf en 2020

Pour ce qui sont des surfaces foliaires atteintes par la rouille jaune, de manière globale, Ces figures indiquent que les feuilles les plus anciennes sont plus infectées que celles qui les suivent. Peu importe la répétition, la F3 est celle ayant le plus grand pourcentage de surfaces atteintes suivie de la F2 et de la F1 à quelques exceptions près.

- **Evolution des symptômes sur les feuilles**





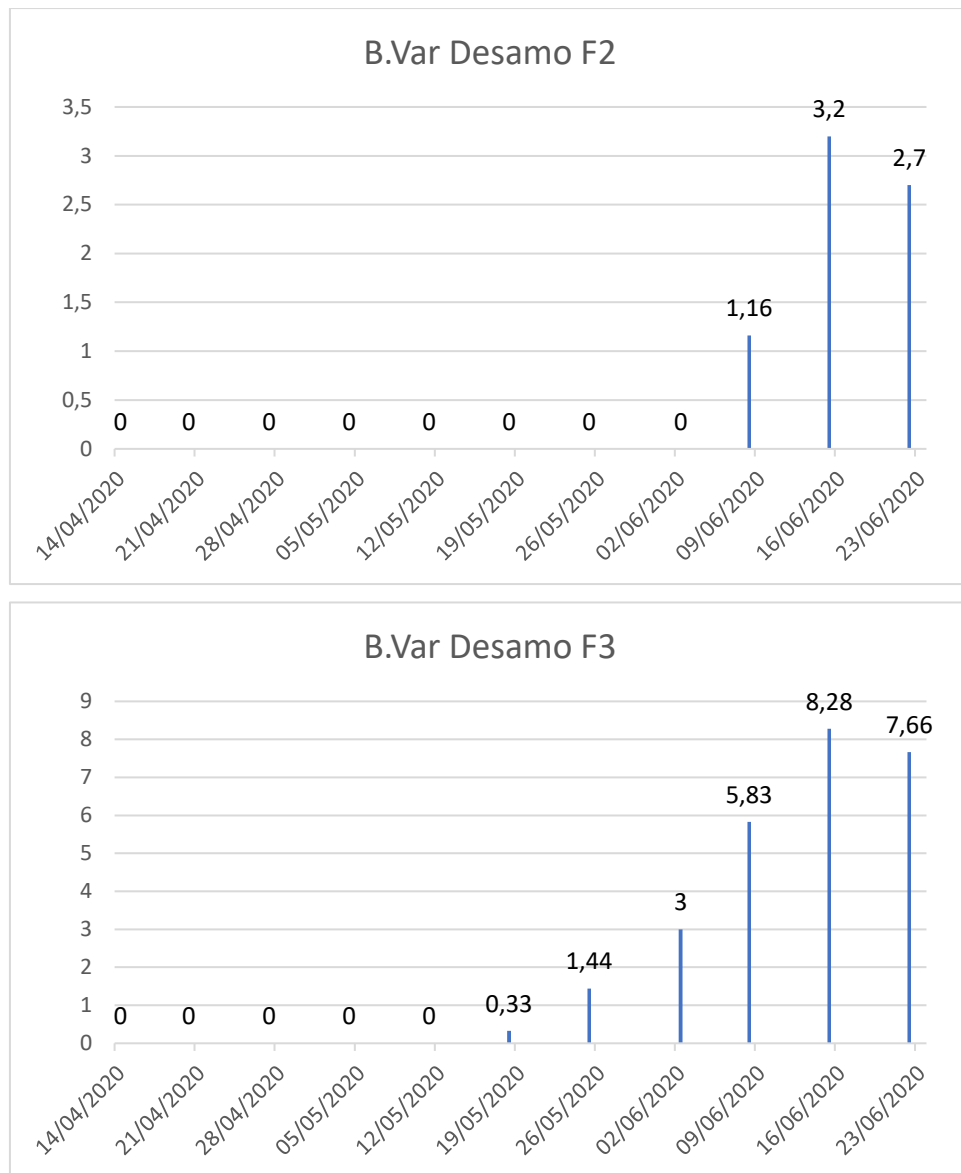


Figure 17: Evolution de la rouille jaune sur les feuilles de blé en fonction des variétés

Nous pouvons constater d’après les histogrammes de la figure 17 que peu importe la variété la maladie commence à la F3 avant de se répartir vers la F2 et la F1 ; ce qui justifie le pourcentage élevé des parties touchées par la rouille jaune.

Aussi après que *P.Striiformis* ait infecté le blé, il y’a un temps de latence nécessaire pour que les symptômes commencent à être visibles sur les plants de blé.

- Simulation de la rouille jaune sur le blé

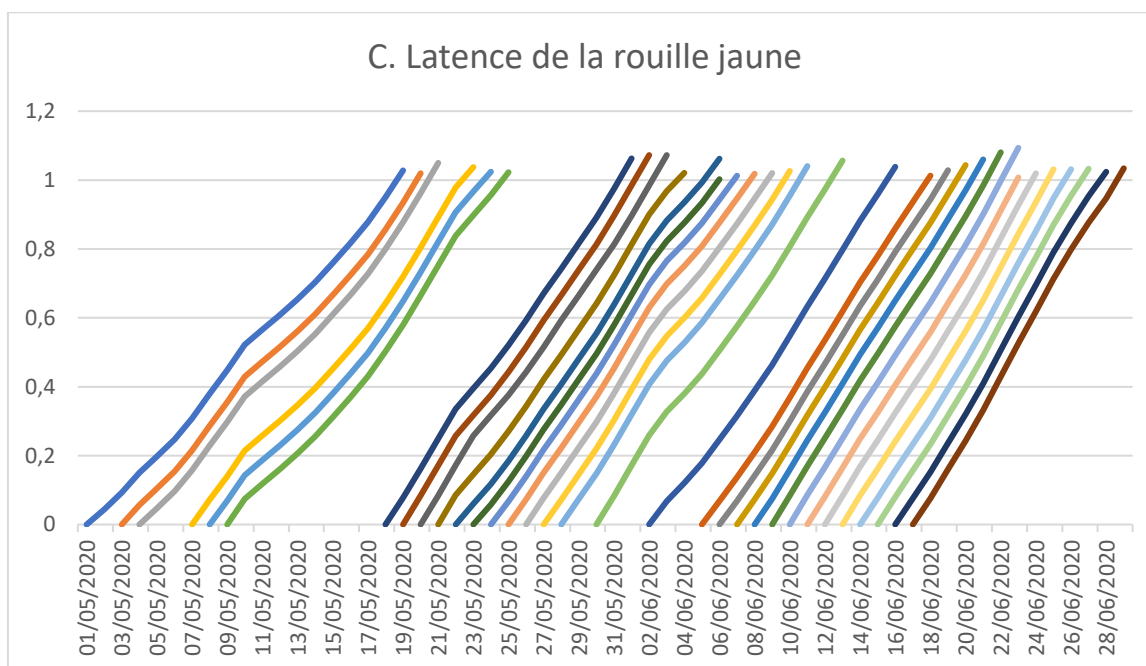


Figure 18: Latence de la rouille jaune sur le blé

Pour un pourcentage croissant de l'émergence des feuilles partant de la F6 jusqu'à la F1, la simulation du risque d'infection de la rouille jaune sur le blé a été effectuée pour l'année 2020 à Bettendorf sur les variétés Desamo et Kerubino. La figure 18 représente le pourcentage moyen de la surface foliaire affectée par la rouille jaune et la quantité d'infections. Nous pouvons ainsi constater que les premiers symptômes ont été visibles entre le 15 et le 17 du mois de mai 2020.

4.1.3- Description des conditions météorologiques de la saison culturale de 2020

La rouille jaune sur le blé et le triticale a été suivie durant la campagne 2020-2021 entre le printemps et le début de l'été 2020.

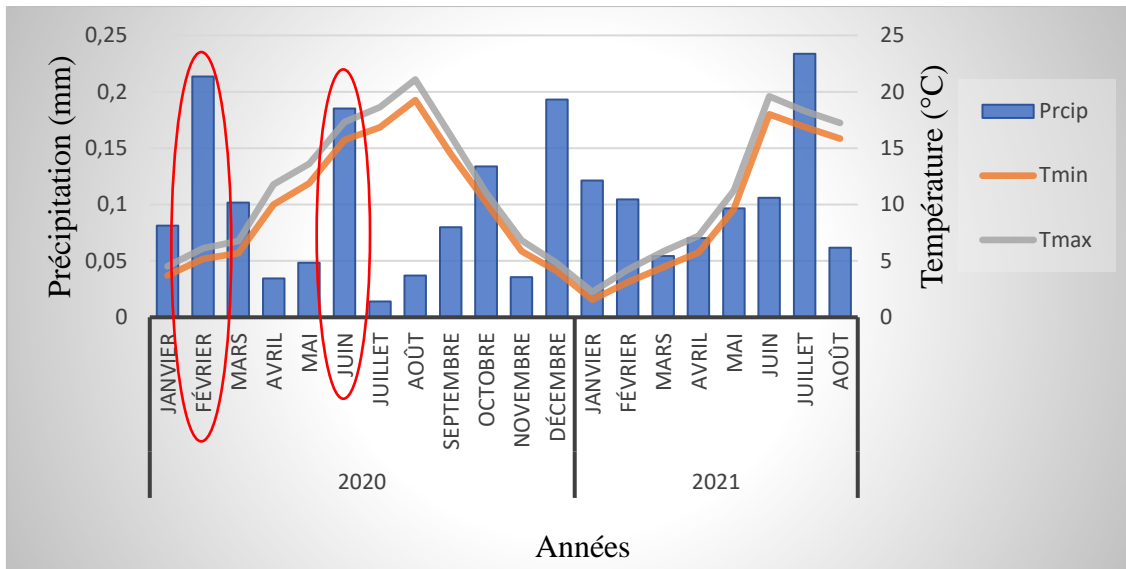


Figure 19: Conditions météorologiques de 2020-2021

La figure 19 décrit les précipitations et températures minimales et maximales par mois de la saison 2020-2021, les données sont celles de la station d’ASTA pour le site de Bettendorf.

En début de saison, les températures ont varié de façon normale avec des températures maximales entre juin et août. On constate que majoritairement les températures ont respecté la norme qui voudrait qu’en hiver, automne et printemps les températures soient basses et qu’elles augmentent en été que ce soit pour l’année 2020 que 2021. Cependant, le rythme des pluies s’est vu augmenter au mois de juin 2020 mais, les températures sont toujours allées de manière croissantes avec un pic entre la fin du mois de juillet et le début du mois d’août pour l’année d’étude (2020).

Ces températures chaudes ont favorisé un développement précoce de la rouille jaune.

Les données météorologiques horaires ASTA (température, pluie, humidité relative) enregistrés montrent que cette année se caractérise par un climat très particulier car en dehors du mois de février pendant lequel nous avons enregistré beaucoup de pluies, les mois de mars, avril et mai étaient moins pluvieux ; on se serait attendu au contraire car nous imaginions avoir beaucoup plus de pluies au fur et à mesure que le printemps avance. En début d’été par contre, on remarque la présence de fortes pluies au mois de juin ce qui ne devrait pourtant pas l’être.

Pour ce qui est de l’humidité relative, elle est restée presque constante durant toute la campagne 2020-2021 ; cette courbe concorde avec la courbe de précipitation car plus il pleut plus l’humidité relative est grande comme nous le présente la figure suivante :

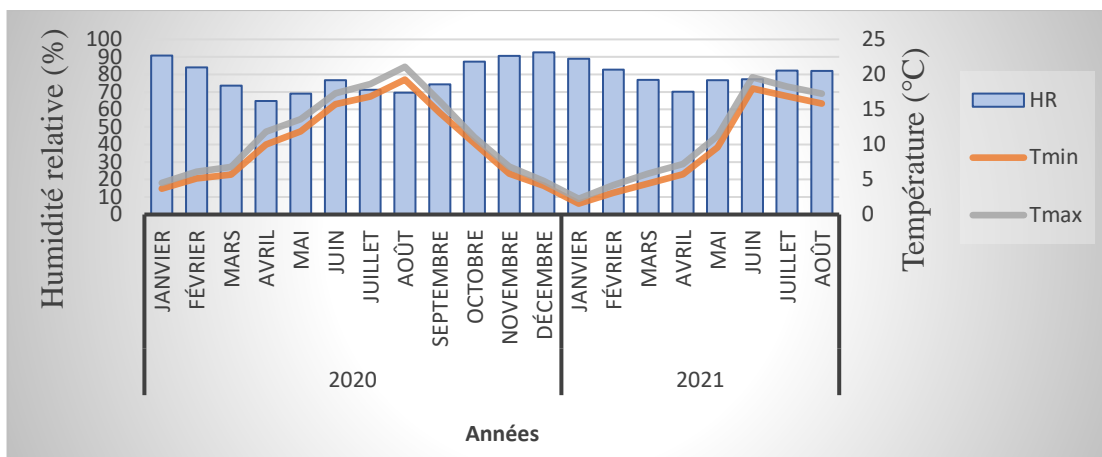


Figure 20: Variation de l'humidité relative en fonction de la température

4.1.4- Comparaison des résultats obtenus de la caractérisation de la rouille jaune sur le triticale et sur le blé

Nous avons pu observer des deux caractérisations que, les premiers symptômes commencent à être visibles sur les cultures entre mi-mai. Ensuite que ce soit pour le blé comme pour le triticale, la maladie commence par les anciennes feuilles avant de se propager peu à peu vers les nouvelles feuilles (de la F3 vers la F1).

Pour ce qui est des courbes de latence, notons que les conditions météorologiques de l'année culturale 2020 ont été favorables au développement de *P.Striiformis* ; néanmoins il apparaît d'après les résultats obtenus à partir du modèle de prédiction de la maladie que, le blé a été autant touché pendant cette période que le triticale. Aussi les périodes d'infection sont relativement les mêmes pour les 2 cultures, correspondant à la période allant de mi-mai à juin. Sauf qu'en se basant sur les différentes probabilités du tableau de contingence, nous constatons que le modèle nécessite des ajustements afin d'être validé pour la prédiction de la rouille jaune sur le triticale.

4.2 Interprétation et discussions

Des résultats précédents, il ressort que les conditions météorologiques ont été favorables au développement de la rouille jaune sur la culture triticale pendant l'année 2020. En effet, la rouille jaune est favorisée par des hivers doux (Gladders, 2007). De plus, le printemps a été plus favorable comme l'hiver au développement de la rouille jaune. En effet, selon le Livre Blanc Céréales (2017), la rouille jaune est favorisée par un printemps frais et humide.

Pour ce qui est de la caractérisation de la rouille jaune sur la culture triticales, nous avons trouvé que la période d'infection (symptômes visibles de la maladie) était comprise entre le mois de mai et celui de juin (début de la période d'infection 17 mai 2020) pendant lesquels la température moyenne est autour de 15°C, l'humidité relative moyenne était à 97% et les précipitations moyennes de 2,68 mm. Cette période (mai-juin) correspond au stade 33 jusqu'au stade 77 du développement de la culture. Ces résultats corroborent ceux de Moussa El, 2017 qui lors de son étude sur la construction d'un modèle météorologique basé sur la prédiction de la rouille jaune sur le blé d'hiver au Luxembourg avait trouvé des résultats similaires sauf que les stades de développement allaient du stade 33 au stade 85. Sur cette base, nous pouvons dire que le triticales est une culture printanière.

La sévérité moyenne de rouille jaune par étage foliaire au cours du suivi de la culture montre que la maladie commence à la F5 avant de se propager directement à la F4, F3, F2 et F1. Cependant on constate une décroissance de ce pourcentage à la F1. Ces résultats ne corroborent pas tout à fait avec ceux de Meurs 2018 car ayant une analyse de la sévérité par étage foliaire en se basant sur les dates de semis. À cet effet, il n'y a que pour le semis du mois de novembre que nous avons des résultats similaires et pas pour le semis du mois d'octobre (« Sur le semis de novembre, la rouille jaune apparaît en premier lieu sur les plus anciennes feuilles F5 et F4 »). Néanmoins ayant des similarités de nos résultats par rapport à ceux de Remi quant à l'apparition des symptômes par étage foliaire, on pourrait penser que les semis ont eu lieu au mois de novembre ; à cet effet, selon les informations fournies dans la littérature par Gladders (2007) la rouille jaune touche plus sévèrement les semis de novembre que ceux d'octobre.

Nous avons également pu constater que les symptômes de la rouille sur le triticales évoluaient de manière croissante avec le stade de développement et commençaient à être prononcés à partir du stade 55 qui correspond à l'épiaison (avec un pic au stade 65 pour la variété Lombardo et au stade 71 pour la variété Kasyno). Ceci s'explique par le fait que, dans les stades précédents, l'agent serait en pleine mutation car sortant d'une période de dormance pendant l'hiver. Ces résultats corroborent ceux de Moussa Jarroudi qui avait trouvé en 2005 une évolution spectaculaire de la rouille jaune à partir de l'épiaison pour atteindre son maximum pendant la maturité laiteuse (entre GS69 et GS77). Ceci peut s'expliquer par le fait que la culture étudiée est différente entre notre cas et sien.

Il est peu probable que la première vague d'infection (au mois du semis) soit responsable des symptômes. En effet, selon Savary et al. (2016), les symptômes apparaissent 10 à 14 jours après l'infection ; ce qui signifierait que les infections qui ont eu lieu à partir du mois de mai soient celles ayant faits apparaître les symptômes de la rouille sur les plants de triticale. Les symptômes auraient donc dû apparaître beaucoup plus tôt si l'infection avait eu lieu au mois d'avril car pendant tout ce mois nous n'avons pas eu de symptômes d'après la figure 15. L'hypothèse la plus probable est que, durant la première vague d'infection, les conditions étaient réunies pour permettre l'infection mais les spores n'étaient pas présentes dans la culture. *P.Striiformis* le champ probablement entre le 1^{er} et le 4 mai, en effet, les symptômes apparaissent sur les variétés sensibles entre 8 à 14 jours après ces dates, ce qui correspond aux informations fournies par Savary et al. (2016).

Pour ce qui de la sévérité de la rouille jaune en fonction de la variété, l'analyse de la variance (suivant le test de Fischer) relève qu'il y'a une forte probabilité d'apparition de la maladie pour les plants de la variété Lombardo que pour ce ceux de la variété Kasyno. Il est à noter que, que ce soit El Jarroudi M. ou Remi Meurs, ces deux auteurs avaient trouvé que la variété avait une influence sur l'apparition de la maladie bien que ce ne soit pas les mêmes variétés qui ont été étudiées tant dans notre cas que dans les leurs.

Les étages foliaires (F1, F2 et F3), correspondent aux trois dernières feuilles du blé d'hiver, qui sont très fortement exposés au risque d'infection de la rouille jaune entre le stade deuxième nœud et la maturation (GS33-85 en 2022 à Bettendorf). Ces résultats corroborent ceux de El Jarroudi et al., 2017 qui a reporté que les feuilles F1, F2 et F3 du blé d'hiver sont très fortement exposées au risque d'infection de la rouille jaune entre le stade deuxième nœud et la maturation.

Dans la zone d'étude Bettendorf, les conditions météorologiques ont été favorables (température entre 4 et 16 °C, humidité supérieure à 92 °C, et précipitation inférieure ou égale à 0,1mm) au développement de *P.Striiformis*, mais il reste toujours lié à la sensibilité des variétés.

Dans le présent travail, le modèle épidémiologique étudié est très simple et efficace puisqu'il repose uniquement sur le processus de calcul du risque d'infection par la rouille jaune en simulant l'évolution de la maladie en fonction des conditions agrométéorologiques. En d'autres termes, ce modèle analyse l'interaction entre la progression de la maladie et les

conditions climatiques locales favorables au développement de l'infection dans les cultures du blé d'hiver afin de modéliser la progression de la maladie.

Le modèle étudié a été évalué sur deux variétés de blé d'hiver différentes, à savoir Kerubino et Desamo et sur deux variétés de triticales à savoir : Lombardo et Kasyno. Il a prédit avec précision l'apparition de la maladie dans le site de Bettendorf sur les deux cultures.

Par ailleurs, l'évaluation des données épidémiologiques étudiées en 2020 est cohérente avec les résultats obtenus par El Jarroudi et al., 2017 et 2020. Par conséquent, les résultats obtenus montrent que le modèle prévisionnel de la rouille jaune peut être utilisé de manière satisfaisante pour prédire les périodes de latence et d'infection sur les cultivars de triticales dans des conditions agrométéorologiques bien déterminées ; cependant il est nécessaire de revoir les conditions météorologiques de prédiction de la rouille jaune sur le triticales ; car d'après les différentes probabilités calculées, on observe qu'elles ne sont pas très proche 1.

4.3 Limites de l'étude

Dans l'ensemble nous avons pu analyser et comprendre la base de données qui nous a servi pour nos analyses.

Néanmoins, quelques limites de l'étude pourrait venir du temps relativement long de l'analyse des données car le modèle étant nouveau dans la prédiction de la rouille jaune sur le triticales. Toutefois, ce travail a été facilité grâce aux activités réalisées pendant le stage. L'autre limite de l'étude serait due au fait que nous ayons pas eu des informations sur la date de semis, donc il a fallu que nous fassions des rapprochements entre les résultats que nous avons obtenus et d'autres auteurs pour pouvoir estimer une date de semis.

4.4 Implication de ces résultats pour la prévention de la rouille jaune sur le blé et sur triticales

Ces résultats d'analyses nous interpellent sur le type d'action à mettre en œuvre pour lutter efficacement contre la rouille jaune.

En se basant sur les conditions météorologiques, comme le pathogène est en état de dormance pendant l'hiver et surtout lorsque l'hiver est rude, nous pouvons envisager à faire des cultures ou des semis de contre saison et d'appliquer des méthodes d'irrigation.

Pour ce qui est des variétés, il serait souhaitable d'utiliser la variété Kasyno qui semble mieux résistante au pathogène contrairement à la variété Lombardo ; et la variété Desamo pour le blé contrairement à la variété Kerubino qui semble être plus touchée.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de fin d'étude élaboré sous le thème : « Étude comparative des paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur la culture triticales avec ceux favorisant la même maladie sur la culture de blé au Grand-Duché du Luxembourg » s'inscrit dans le cadre des disciplines d'agrométéorologie et de pathologie végétale. Il voudrait contribuer à l'amélioration de la compréhension des relations qui existent entre les céréales et le développement des parasites affectant ces cultures au Grand-Duché de Luxembourg.

Il avait pour but de comparer les paramètres météorologiques favorisant la rouille jaune sur la culture triticales avec ceux favorisant la même maladie sur la culture de blé au Luxembourg plus précisément en se basant sur les données de la zone de Bettendorf.

Les céréales en général mais le blé et le triticales sont des cultures importantes dans le système agricole luxembourgeois. Toutefois, le développement de ces cultures se trouve confronté à plusieurs contraintes biotiques, notamment les maladies fongiques. Parmi lesquelles, la rouille jaune qui est considérée parmi les maladies les plus répandues et destructives de la culture des céréales (surtout le blé) et qui constitue un problème majeur provoquant d'énormes dégâts sur ces cultures entraînant d'importantes pertes de rendement.

Les résultats obtenus ont montré que les conditions météorologiques de l'année 2020 ont été favorables au développement de la rouille jaune sur le blé et sur le triticales (la température moyenne est autour de 15°C, l'humidité relative moyenne était à 97% et les précipitations moyennes de 2,68mm).

Pour ce qui est de la caractérisation de la rouille jaune sur le triticales et sur le blé, nous avons trouvé que le stade de développement, la variété avait un effet significatif sur la sévérité de la maladie ; à cet effet la variété Lombardo pour le triticales est la plus touchée ainsi que la variété Kerubino pour le blé. Les courbes de latence ont révélé que les symptômes commencent à être visibles en mi-mai jusque Juin. Aussi les événements d'infections sont plus élevés chez le blé comparé au triticales.

A propos du modèle de prédiction de l'infection des rouilles, les conditions d'infection choisies ont permis de faire correspondre l'apparition de symptômes à des périodes de latences. Chaque phase de latence ne semble toutefois pas induire le développement du champignon. L'induction de la maladie peut donc être prédite mais le développement du champignon nécessite aussi la présence de spores. Le modèle permet de prédire efficacement la rouille jaune

sur le blé et le triticale sauf que pour la seconde culture il est nécessaire de faire des études d'approfondissement afin de mieux valider le modèle.

En ce qui concerne les perspectives, il pourrait être intéressant pour le suivi en dynamique de faire une collecte plus approfondie trois fois par semaine pour les périodes après le constat de l'explosion des symptômes de la rouille sur le triticale et d'analyser sur cette période les conditions climatiques précises, la présence et la quantité de spores sur la parcelle ainsi que de connaître précisément la résistance de la variété durant cette période. Cela permettrait, en effet, de mieux comprendre les facteurs favorisant l'intensification de la maladie.

De plus, il serait intéressant de développer au Luxembourg une double échelle de cotation des résistances aux maladies, avec une séparation, du niveau de résistance au stade plantule et du niveau de résistance au stade adulte et ce, pour chaque variété. Cette double échelle permet de distinguer plusieurs situations et donc d'affiner encore un peu plus le positionnement des traitements fongicides.

De plus, l'idéal serait d'analyser des données recueillies depuis plusieurs années afin d'avoir un panel plus large de conditions culturales. Ces données devraient de préférence être recueillies par la même personne. En effet, malgré l'utilisation d'échelles de cotation, il existe un biais lié aux différences dans les cotations attribuées par des observateurs différents. Cette différence n'a pas été prouvée mais est constatée sur le terrain ou lorsque l'analyse de données débute.

Le modèle pourrait être ajusté pour la culture triticale. Il pourrait être intéressant de modifier certaines valeurs des conditions d'infection du modèle qui ont été adoptées pour le blé afin de trouver les valeurs qui donnent les meilleures prédictions. Le modèle pourrait également développer d'autres aspects importants dans le développement de la rouille jaune, comme l'influence du vent, mais également la propagation sur une feuille et entre les feuilles d'une même plante car il ne prend en compte actuellement que l'infection d'une feuille unique.

Pour ce qui est des contributions de ce travail, il a permis d'avoir une analyse et des conclusions plus claires de la rouille jaune sur le triticale ; aussi il a permis de vérifier que les conditions ayant permis le développement de ce modèle de prédiction de la rouille jaune sur le

blé se basant sur les conditions est efficace peu importe les années d'études et de ce fait confirme la viabilité du modèle.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdi. (2015). *Distribution spatiale des maladies fongiques du blé dur (Triticum durum Desf.) et effet de la fusariose sur le rendement en zones semi arides de Sétif. Mémoire Magis.Uni. Sétif.*
- Abcassis J.. (1991). *Qualité du blé dur, de la semoule et de la pâte alimentaire-ind. Des céréales*. Juillet-Aout.pp7-11.
- Abcassis J. (1993). *Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur meunière et la valeur semoulière des blés.* Ind .Céréales N°, pp32.
- Activer tous les leviers agronomiques contre les maladies des céréales.* (s. d.). Terre-net. Consulté 7 juin 2023, à l'adresse <https://www.terre-net.fr/2015/article/112587/activer-tous-les-leviers-agronomiques-contre-les-maladies-des-cereales>
- Agriculture.* (s. d.). Consulté 31 janvier 2023, à l'adresse https://european-union.europa.eu/priorities-and-actions/actions-topic/agriculture_fr
- Agriculture et alimentation.* (s. d.). World Bank. Consulté 31 janvier 2023, à l'adresse <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/agriculture/overview>
- Amil R. El. (2016). *Effect of host and temperature on the population structure of Puccinia striiformis f. sp. tritici, responsible of yellow rust in the Middle East.*
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01261429>.
- AMIRA Djahida, FADEL Meryem. (2013). *La Sélection Variétale du Blé Dur à Partir des Paramètres Technologiques.* Mémoire de Master, Univ 8 Mai 1945 de GUELMA. P4-5/P6-15/ 59.
- ANONYME. (2006). *La culture du triticales.* Ed ITGC
- Anonyme. (2006). *Les marchés mondiaux du blé.* USDA. <http://www>

agpb.com/fr/dossier/eco/marchesmondiaux_2006.pdf. (25.03.2013).

Ali, S., Rodriguez-Algaba, J., Thach, T., Sørensen, C. K., Hansen, J. G., Lassen, P., Nazari, K.,

Hodson, D. P., Justesen, A. F., & Hovmøller, M. S. (2017). Yellow rust epidemics worldwide were caused by pathogen races from divergent genetic lineages. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1057.

Arvalis – Institut du végétal. (2015) *Lutte contre les maladies*

BACHIR OUDJEHIH, AMAR BOUKABOUB. (2005). *Etude cytogénétique du triticales cv Beagle in Jon Lebey European studies*, London pp 5-17

Bahri, P. B. A. (s. d.). *Adaptation et structuration spatiale des populations méditerranéennes de rouille jaune du blé (Puccinia striiformis f.sp. Tritici)*.

Baldy C. (1986). Comportement des blés dans les climats méditerranéens. *Ecologia Mediterranea*, (12), 7388.

Baldy C. (1992). *Effet du climat sur la croissance et le stress hydrique du blé en Méditerranée Occidentale. In Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne, diversité génétique et amélioration variétale*. Montpellier, Les Colloques 55, 191-203.

BASF. (2019a) Rouille brune du blé - Maladies du blé. Available at:

https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/rouille_brune_du_ble

BASF. (2019b) Rouille jaune du blé – Maladies du blé. Available at:

https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/rouille_jaune_du_ble

BASF. (2019c) Septoriose du blé, tache foliaire - Maladies du blé. Available at:

https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/maladies_du_ble/septoriose_du_ble_tache_foliaire

Bataille C., Duvivier M., Eylenbosch D., Heens B., Mahieu O., Meza Morales W. & Monfort B., (2015). 6. *Lutte intégrée contre les maladies*. In: Livre Blanc « Céréales »

- Bataille C., Duvivier M., Heens B., Mahieu O., Meza R. & Monfort B. (2017). In : Livre Blanc Céréales – 1967-2017 50 ans de Partenariat entre agriculteurs et chercheurs – Edition février 2017.
- Belaid C. (2012) .*Etude comparative de quelques caractéristiques technologiques des blés durs locaux et importés destinés à la fabrication de semoule, Mémoire de Master, Option: Qualité des produits et sécurité alimentaire, Deprt.Biologie.Univ 08 MAI 1945.*
- Belaid D. (1990). *Aspect de la céréaliculture en Algérie.* Edition OPU. Alger, 126 p.
- Benmoussa, A., & Houideg, F. (2020). *Contribution à l'étude du comportement végétatif de quelques variétés de triticales dans la région d'El Oued.* <http://dspace.univ-eloued.dz:80/xmlui/handle/123456789/8050>
- BenYoussef, S., Kachout, S. S., Abidi, S., Saddem, B., Ismail, J., & B. Salem, H. (2019). Effect of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Forage Yields and Quality of Hairy Vetch (V, Roth) Triticale (X, Witmack) Mixtures. *The Open Agriculture Journal*, 13(1). <https://doi.org/10.2174/1874331501913010090>
- Benbelkacem A, *Le triticales, une culture en développement. Céréaliculture* n°217, pp 22-26
- Bernard M. (1992). *Le triticales.* Edition INRA .Alger pp 39-45
- Brouwer J. (1976). *PORC, first austr. Poltry and stock feed convention.* Melbourne, pp 10-25
- Boulefdjghal H.Djouad D.et Labed F. (2007). *Evaluation des caractères technologiques de quatre variétés de blé dur (Triticum durum Desf.), Mémoire de l'Ingéniorat, Option: Génie-biologie, Deprt.Biologie.Univ 08MAI 1945, Guelma: pp 1- 42- 43.*
- Belagrouz Abdenour. (2013). *Analyse du Comportement du Blé Tendre, Variété El WIFAK (Triticum aestivum L.) Conduite en Labour Conventionnel, Travail Minimum et Semis Direct sur Les Hautes Plaines Sétifiennes.* P24.

Brady, N.C. and Weil, R.R. (2014). *The Nature and Properties of Soils*, 14th Edition. 14th edition. Upper Saddle River, N.J: Pearson.

Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales | Situation alimentaire mondiale | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. (s. d.).

Consulté 20 août 2023, à l'adresse <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/>

Carte_luxembourg_arrondissements_judiciaires.gif (Image GIF, 407 × 568 pixels). (s. d.).

Consulté 5 avril 2023, à l'adresse

https://www.cartograf.fr/pays/img/luxembourg/carte_luxembourg_arrondissements_judiciaires.gif

Charvet, J.-P. (1977). Le blé dans le monde. Évolution récente de la consommation, de la commercialisation et de la production. *Annales de géographie*, 86(478), 686-723.

<https://doi.org/10.3406/geo.1977.17679>

Chen, X. M. (2005). Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. Sp. *Tritici*] on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(3), 314-337.

<https://doi.org/10.1080/07060660509507230>

Cheyron P., Pope C., et Leconte M. (2016). *Rouille jaune sur blé tendre les résistances*

dépendent aussi du stade. In : Perspectives agricoles N°434 [En ligne]

https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/33/ce/a7/12/434_8977845218722379211.pdf

CIC., Conseil International des Céréales. (2016). *Les statistiques mondiales, calculées par le*

Conseil International des Céréales. Marché des céréales, 399p.

Climat Luxembourg: Pluviométrie et Température moyenne Luxembourg, diagramme ombrothermique pour Luxembourg—Climate-Data.org. (s. d.). Consulté 4 avril 2023, à

l'adresse <https://fr.climate-data.org/europe/luxembourg/district-luxembourg/luxembourg->

Comment nourrit-on le monde aujourd'hui ? - OCDE. (s. d.). Consulté 31 janvier 2023, à l'adresse

<https://www.oecd.org/fr/agriculture/comprendre-le-systeme-alimentaire-mondial/comment-nourrit-on-le-monde-aujourd'hui/>

creemson. (2022, juin 30). Quelle est la céréale la plus cultivée au monde? *Pepinière au Sénégal.*

<https://pepiniere.sn/quelle-est-la-cereale-la-plus-cultivee-au-monde/>

Defosse, T. A., Sharma, A., Mondal, A. K., Dugé de Bernonville, T., Latgé, J.-P., Calderone, R.,

Giglioli-Guivarc'h, N., Courdavault, V., Clastre, M., & Papon, N. (2015). Hybrid histidine kinases in pathogenic fungi. *Molecular Microbiology*, 95(6), 914-924.

<https://doi.org/10.1111/mmi.12911>

Denolf, S. (s. d.). *Etude de l'effet du choix variétal, de l'usage de mélanges variétaux et de la protection fongicide sur la dynamique des principales maladies fongiques et sur les rendements interannuels du blé d'hiver.*

De Vallavieille-Pope C, Huber L, Leconte M, Bethenod O (2002) Preinoculation effect of light quantity on infection efficiency of *Puccinia striiformis* and *P.triticina* on wheat seedlings. *Phytopathology* 92, 1308-1314.

De Vallavieille-Pope C, Huber L, Leconte M, Goyeau H (1995) Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration, and infection of *Puccinia recondite* f.sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* 85, 409-415.

De Vallavieille-Pope C, Picard-Formery H, Radulovic S, Johnson R (1990) Specific resistance factors to yellow rust in seedlings of some french wheat varieties and races of *Puccinia striiformis* Westend in France. *Agromonie* 10, 103-113.

D'ARVISENET Gabriel, 2011. les grains de blé : leur valeur alimentaire et leurs procédés de transformation technologique en pain. P19-

Docte, H. L. (1849). *Exposé général de l'agriculture luxembourgeoise ou Dissertation raisonnée sur les meilleurs moyens de fertiliser les landes des Ardennes, sous le triple point de vue de la création de forêts, d'enclos, de rideaux d'arbres, de prairies ...* Hayez.

El Jarroudi, M., Giraud, frederic, Tychon, B., Hoffmann, L., Maraite, H., & Delfosse, P. (2011). Prévoir la septoriose. Un modèle belge au Luxembourg. Modélisation et simulation prévisionnelle de la septoriose des feuilles par PROCULTURE pour une gestion durable du blé d'hiver. *Phytoma - La défense des végétaux*, 642, 43-46.

El Jarroudi, M., Tychon, B., Hoffmann, L., & Maraite, H. (2012, mai 30). *Modélisation et simulation prévisionnelle de la septoriose et rouille brune des feuilles pour une gestion durable du blé d'hiver.*

Esquirol, L. (s. d.). *Comment coupler observations et prédictions pour améliorer les prédictions d'épidémie de Septoriose sur le blé?*

FAO. (2000). *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2000* Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Food & Agriculture Org.

Gavira, F. T. (2012). 9. *Évolution du marché mondial du blé au cours des cinquante dernières années.*

Ginste, V. D. (s. d.). *Dynamique des principales maladies fongiques foliaires en froment d'hiver : Approche de terrain et modélisation.*

Gladders, P., Langton, S. d., Barrie, I. a., Hardwick, N. v., Taylor, M. c., & Paveley, N. d. (2007). The importance of weather and agronomic factors for the overwinter survival of yellow rust (*Puccinia striiformis*) and subsequent disease risk in commercial wheat crops in England.

Annals of Applied Biology, 150(3), 371-382. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00131.x>

Gohin, A., Guyomard, H., & Aubert, D. (s. d.). *Evolution de la politique agricole commune. Introduction.*

Histoire de la PAC. (s. d.). CAPEye. Consulté 14 mars 2023, à l'adresse <https://capeye.fr/histoire-de-la-pac/>

Introduction. (2009). In *Les filières céréalières* (p. 3-3). Éditions Quæ. <https://www.cairn.info/les-filieres-cerealieres--9782759203185-p-3.htm>

Jarroudi, M., & Vrancken, C. (2009). Fusarioses sur blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg. *Phytoma-La Défense*
https://www.academia.edu/20058904/Fusarioses_sur_bl%C3%A9_dhiver_au_Grand_Duch%C3%A9_de_Luxembourg

Les céréales, culture essentielle de l'alimentation. (s. d.). Binette & Jardin. Consulté 31 janvier 2023, à l'adresse <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1519-cereales-culture-essentielle-alimentation.html>

Livre du 125e anniversaire | Société des naturalistes luxembourgeois. (s. d.). Consulté 28 février 2023, à l'adresse <https://www.snl.lu/publications-wp/bulletin-de-la-snl/livre-du-125e-anniversaire/>

Louër, Q. (2015). *Année universitaire 2014-2015.*

Maladie : Rouille jaune, une race s'attaque aux céréales. (s. d.).

MALADIES DES CEREALES - (page 2)—PROTEGER LE BLE C'EST PROTEGE LA VIE. (s. d.). Consulté 16 mars 2023, à l'adresse <http://cereales-ble.blogg.org/maladies-des-cereales-c26657804/2>

Malika, M., & Zeyneb, S. (s. d.). *Etude du comportement de quelques variétés de blé tendre oasisien*

(Triticum aestivum L.) de la région d'Adrar.

Maumené, C. (2008). *Tirer le meilleur des gènes.*

Maumené, C., & Maufra, J.-Y. (2008). *Rouille jaune : Une apparition remarquée.*

Memoire Online—Etude du comportement et sélection de 15 variétés de triticales cultivées en zone subhumide à Oued Smar en Algérie—Hormisdas Hariyongabo. (s. d.). Memoire Online.

Consulté 16 mars 2023, à l'adresse https://www.memoireonline.com/01/14/8556/m_Etude-du-comportement-et-selection-de-15-varietes-de-triticales-cultivees-en-zone-subhumide--O4.html

Meurs, R. (s. d.). *Etude de l'effet des conditions climatiques, de l'influence du choix variétal et de l'efficacité des traitements fongicides sur la dynamique des principales maladies fongiques du blé d'hiver.*

mooh90. (2021, mars 16). Situation du triticales. *Agronomie.* <https://agronomie.info/fr/situation-du-triticales/>

Moreau, J.-M. (2007). 6. *Lutte contre les maladies.*

Publication du rapport d'activité 2021 du ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural. (2022, mars 17). [Text]. http://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2022/03-mars/17-rapport-activite-agriculture.html

Références bibliographiques. (2009). In *Les filières céréalières* (p. 163-165). Éditions Quæ. <https://doi.org/10.3917/quæ.berge.2009.01.0163>

Roelfs, A. P., Singh, R. P., & Saari, E. E. (1992). *Rust diseases of wheat : Concepts and methods of disease management.* CIMMYT. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Rust+diseases+of+wheat%3A+Concepts+and+methods+of+disease+management&author=Roelfs%2C+A.P.+%28Minnesota+Uni

[v.+%28USA%29.+Cereal+Rust+Laboratory%29&publication_year=1992](#)

Rouille jaune sur triticales -. (s. d.). Consulté 15 mars 2023, à l'adresse <https://www.agrifind.fr/alertes/triticales/triticales-rouille-jaune/>

Rouille jaune—Maladie sur Blé tendre, blé dur, triticales, ARVALIS Résultats 2013. (s. d.). Les Fiches Accidents - ARVALIS-infos.fr. Consulté 20 avril 2023, à l'adresse <http://www.fiches.arvalis-infos.fr>

SdF, A. (2015, septembre 3). Protection des semis : Téléchargez la synthèse 2015. *Semences de France*. <https://www.semencesdefrance.com/actualite-cereales-a-paille/protection-des-semis-telechargez-la-synthese-2015-des-essais-darvalis-institut-du-vegetal/>

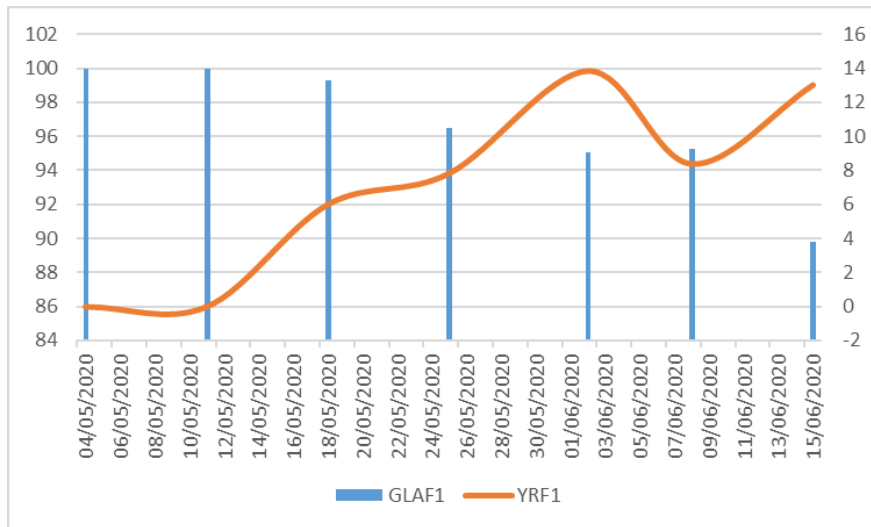
Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H.-J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, 5(3), 291-317. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y>

Wagner, C. (1973). 20 ans de comptes agricoles. *Economie et Statistique*, 50(1), 25-36. <https://doi.org/10.3406/estat.1973.1382>

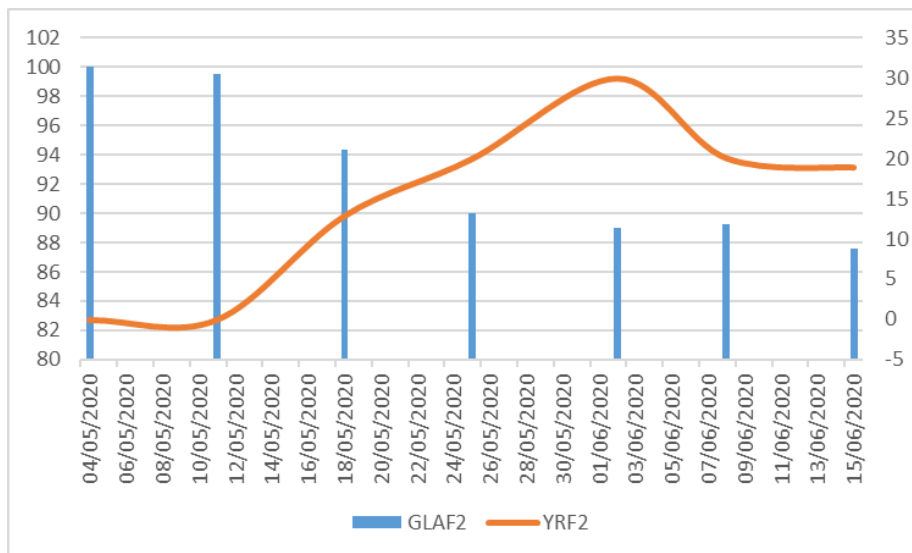
Zheng, W., Huang, L., Huang, J., Wang, X., Chen, X., Zhao, J., Guo, J., Zhuang, H., Qiu, C., Liu, J., Liu, H., Huang, X., Pei, G., Zhan, G., Tang, C., Cheng, Y., Liu, M., Zhang, J., Zhao, Z., ... Kang, Z. (2013). High genome heterozygosity and endemic genetic recombination in the wheat stripe rust fungus. *Nature Communications*, 4(1), 2673. <https://doi.org/10.1038/ncomms3673>

ANNEXES

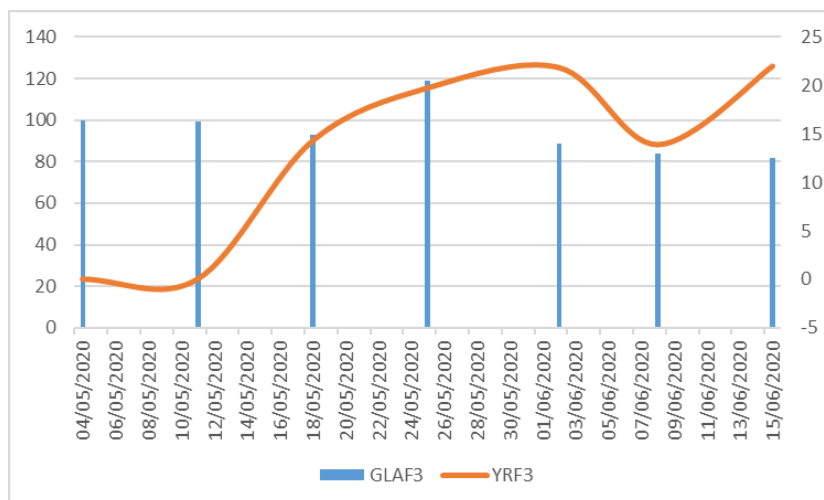
Annexe 1: Evolution des surfaces foliaires de triticale atteintes par la rouille jaune par feuille



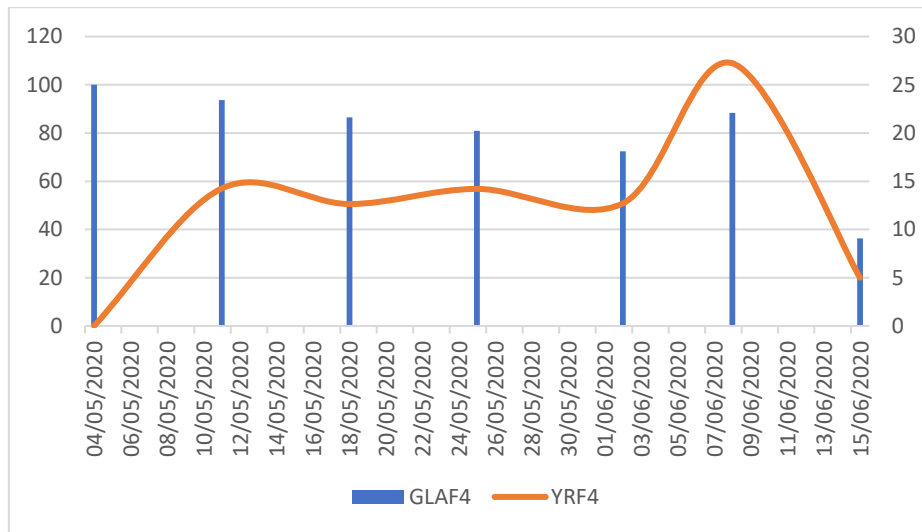
A



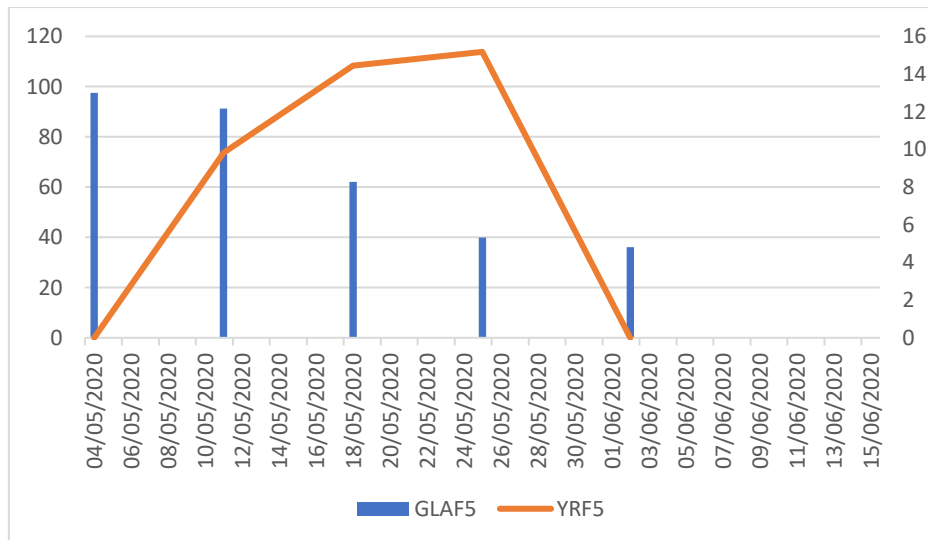
B



C



D



E

Figure 21: Evolution des surfaces foliaires de triticale atteintes par la rouille jaune

La figure 22 présente l'évolution des surfaces foliaires de triticale atteintes par la rouille jaune respectivement sur les cinq premières feuilles représentées par A, B, C, D et E. Ces surfaces restent croissantes pour les feuilles F1, F2 et F3 ; et décroissent après un seuil pour les feuilles F4, F5.

Annexe 2: Feuille de collecte des données

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Date	Tmoy		Latence				
0	04/04/2020	6,06		0,0342047				
1	05/04/2020	8,68		0,0467086				
2	06/04/2020	10,21		0,0537147				
3	07/04/2020	12,88		0,0654196				
4	08/04/2020	12,64		0,0643773				
5	09/04/2020	13,97		0,0700394	0			
6	10/04/2020	14,09		0,0705401	0,0705401	0		
7	11/04/2020	13,60		0,0684745	0,1390146	0,0684745	0	
8	12/04/2020	12,52		0,0638896	0,2029042	0,132364	0,0638896	0
9	13/04/2020	8,71		0,0468572	0,2497614	0,1792212	0,1107468	0,0468572
10	14/04/2020	4,55		0,0267214	0,2764828	0,2059426	0,1374682	0,0735786
11	15/04/2020	7,82		0,0426928	0,3191756	0,2486354	0,180161	0,1162714
12	16/04/2020	10,73		0,0560645	0,3752401	0,3046999	0,2362255	0,1723359
13	17/04/2020	13,43		0,0677714	0,4430114	0,3724713	0,3039968	0,2401072
14	18/04/2020	13,09		0,0663055	0,509317	0,4387768	0,3703023	0,3064128
15	19/04/2020	12,11		0,0621236	0,5714405	0,5009004	0,4324259	0,3685363
16	20/04/2020	13,69		0,0688462	0,6402867	0,5697466	0,5012721	0,4373825
17	21/04/2020	14,57		0,0725151	0,7128018	0,6422617	0,5737872	0,5098976
18	22/04/2020	15,40		0,0759174	0,7887192	0,718179	0,6497045	0,585815
19	23/04/2020	13,21		0,0668218	0,855541	0,7850008	0,7165264	0,6526368
20	24/04/2020	12,29		0,0628901	0,918431	0,8478909	0,7794164	0,7155269
21	25/04/2020	9,80		0,0518633	0,9702943	0,8997542	0,8312797	0,7673902
22	26/04/2020	10,59		0,0554097	1,025704	0,9551639	0,8866894	0,8227998
23	27/04/2020	11,45		0,0592448		1,0144087	0,9459342	0,8820447
24	28/04/2020	11,09		0,0576427			1,0035769	0,9396873
25	29/04/2020	12,50		0,0638122				1,0034995

Annexe 5: stade de développement des céréales

- Semi (stade 0) ;
- Le stade de la levée a lieu lorsque la première feuille traverse la gaine rigide et protectrice qui enveloppe, le coléoptile. La durée de ce stade correspond au temps séparant la date de semis et la date de levée. Différentes étapes sont observées pendant ce stade : la germination, l'élongation du coléoptile et la croissance de la première feuille. C'est le Stade 10.
- Le stade 2-3 feuilles est caractérisé par le nombre de feuilles. Celles-ci émergent les unes après les autres suivant un ordre constant et un rythme régulier en fonction de la somme de températures reçues. C'est le stade 19.
- Stade de tallage : L'émergence d'une nouvelle tige (appelée talle) sur le maître-brin à l'aisselle de la feuille la plus âgée marque le début de ce stade. La plante possède alors à ce moment-là trois ou quatre feuilles. Stade 20: tallage.
- Stade de plein tallage : Il est atteint lorsque les plantes portent deux ou trois talles. Il ne comporte pas de caractéristiques précises contrairement aux stades développés précédemment. En effet, il correspond plus à une période qu'à un moment précis puisqu'il suppose que l'on connaisse le nombre de talles. Or celui-ci est variable en

fonction de la température, de la date de semis, de la variété et de l'apport en azote. C'est le stade 26.

- L'émission des talles se termine, les plantes se redressent. Stade 30 : Pseudo-redressement de la tige (stade 30) ;
- Apparition de la F3 (feuille 3) : Le stade 2-3 feuilles est caractérisé par le nombre de feuilles. Celles-ci émergent les unes après les autres suivant un ordre constant et un rythme régulier en fonction de la somme de températures reçues. C'est le stade 31 ;
- Stade 37 : apparition de la dernière feuille ;
- dernière feuille totalement déployée : stade 39 ;
- Stade 1-2 nœuds, la tige qui était constituée de nœuds empilés commence à croître avec l'élongation des premiers entre-nœuds. La croissance de la tige se fait dans un ordre logique, en fonction de l'apparition successive des entre-nœuds. C'est le stade 39.
- Stade 40-49 : Gonflement
- Petit à petit, la gaine de la dernière feuille s'écarte et le sommet de l'épi sort. Ce stade est atteint lorsque 50 % des épis sont à moitié sortis.
- Epiaison : le stade épi à 1 cm est atteint lorsque le sommet de l'épi se situe à 1 cm de la base du plateau de tallage. Il s'agit du passage entre la phase tallage et la phase de montaison. Les valeurs retenues pour ce stade sont 51 (début de l'épiaison), 55 (mi-épiaison) ou encore 59 correspondant à la fin de l'épiaison, moment où l'inflorescence est entièrement sortie de la gaine ;
- Stade de la floraison. Ce stade correspond au moment où les glumelles des fleurs s'ouvrent et les sacs polliniques sortent hors de la fleur. Trois valeurs sont déterminées pour ce stade : 61 (début floraison), 65 (pleine floraison) et 69 (fin floraison qui correspond à la sortie des étamines) ;
- La formation du grain Trois stades sont à différencier pour cet épisode du développement : Stade grain laiteux ou maturité (71-79) les enveloppes des futurs grains commencent à se développer. De nombreuses divisions cellulaires se produisent et les cellules de stockage de l'amidon se forment; Stade grain pâteux (83-89) Les cellules de l'enveloppe se remplissent par des sucres (sous forme d'amidon). La quantité d'eau contenue dans le grain est stable, il s'agit du palier hydrique ;
- Maturité dure / Récolte (90-99) : Lorsque la migration de la matière sèche vers le grain est terminée, ce stade est atteint. Le poids sec du grain a atteint sa valeur maximum.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Année	Date	Cultivar	Répétition	Stage	FF1	GLAF1	SF1	LRF1	MF1	YRF1	RYF1
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	20/04/2020	Kasyno	1								
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		99				1
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		99				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				
2020	18/05/2020	Kasyno	1		55		100				

Annexe 7: Quelques exemples de modèles de prévisions des maladies des céréales

Il existe plusieurs modèles météorologiques utilisés pour prédire la rouille jaune sur le blé. Parmi les plus connus, on peut citer le modèle YELLO de Arvalis, le modèle PROCULTURE, le modèle Epipre, le modèle Episept, et le modèle Proplant. Ces modèles se basent sur différents paramètres parmi lesquels les paramètres météorologiques dont la température, l'humidité relative, les précipitations et la durée d'ensoleillement pour prédire le risque de développement de la maladie. Les données météorologiques sont collectées et traitées pour déterminer si les conditions sont favorables à l'apparition de la maladie dans ce cas la rouille jaune sur les cultures, ce qui permet aux agriculteurs de prendre des mesures préventives pour protéger leurs cultures.

a)- Modèle YELLO

Yello est un modèle qui permet d'évaluer le risque rouille jaune en fonction du climat. Mis au point par ARVALIS, il permet d'estimer la probabilité d'apparition de la rouille jaune. Il prend en compte la date de semis, la sensibilité variétale et de nombreuses variables climatiques.

Un modèle d'alerte basé sur des variables climatiques : Le modèle Yello tient compte de variables climatiques : il est basé sur la pluviométrie et les températures journalières. Le modèle est très sensible à la date de semis. Il intègre le climat de l'année à partir de la date de levée et n'intègre pas d'informations relatives à la période d'interculture qui précède. Le modèle ne préconise pas de date de traitement. En effet, ce n'est pas un outil d'aide à la décision à la parcelle mais un modèle d'alerte.

Prévision du risque maximum : Il s'agit d'un modèle de prévision du risque maximum, calculé sur une situation agronomique « sensible » (parcelle avec inoculum) d'où l'importance des années de référence sur le graphe.

Remarque : La rouille jaune est un parasite obligatoire : elle a besoin des feuilles pour développer son inoculum. En cas de gel, des feuilles disparaissent, on assiste donc indirectement à une perte d'inoculum. La courbe de Yello peut donc descendre lorsque les températures sont faibles, inférieures à -10°C.

b)- Modèle PROCULTURE

Le modèle « PROCULTURE » a été développé en Belgique (Moreau et Maraite, 1999 ; Moreau et Maraite, 2000). Il se base sur les données météorologiques horaires (pluie, température et humidité) des stations météorologiques les plus proches des champs de blé d'hiver, de façon à identifier les périodes d'infection les plus favorables pour *S. tritici*. Suite à chaque nouvelle infection, de nouveaux pycnides apparaissent après une période de latence, calculée selon les équations polynomiales développées par Shaw (1990). Ces équations permettent de calculer la période de latence en fonction de la température moyenne journalière. Pour chaque infection, PROCULTURE calcule $1/P$ en fonction de la température moyenne journalière en degrés centigrades qui exprime la fraction accomplie par jour des délais pour la latence (Rapilly, 1991). Lorsque la somme de ces fractions est égale à 100 % les séquences correspondantes sont achevées, ce qui correspond à la première apparition de nouvelles pycnides (El Jarroudi et al., 2009). Prise en compte de la plante. Ce qui fait la singularité et l'originalité de PROCULTURE par rapport aux autres systèmes est le développement d'un algorithme permettant le couplage d'un module de croissance basé sur le phyllochrome et la prise en compte de la période de latence qui permet à la fois de simuler la formation des cinq derniers étages foliaires et l'évolution de la septoriose sur ces étages (Moreau et Maraite, 2000). Ce phyllochrome est de 130 degrés jours à base 0 °C.

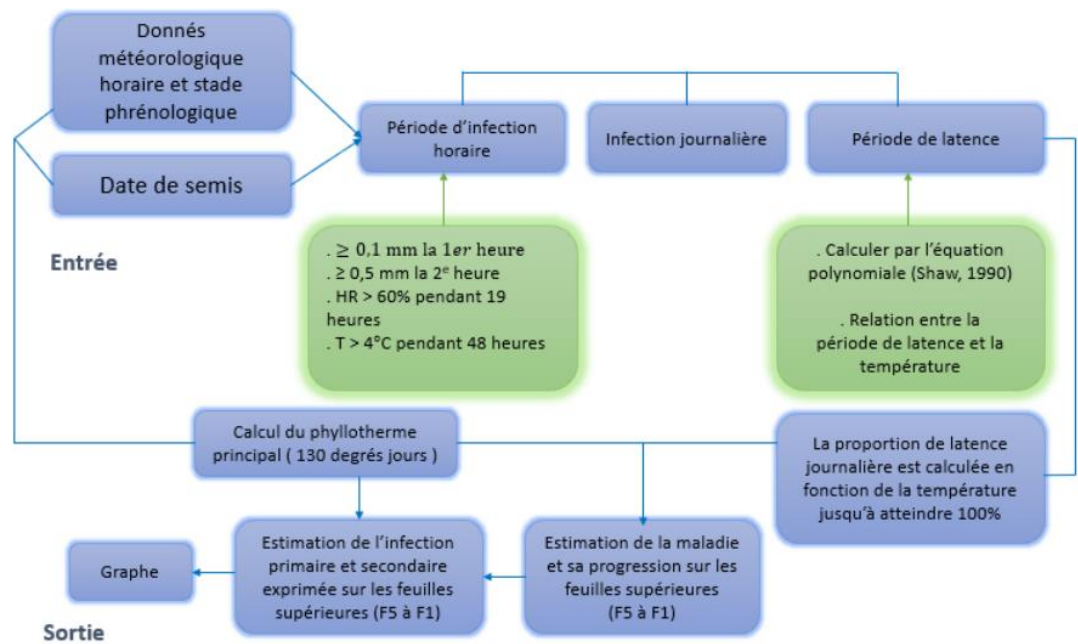


Figure 22: Principes de fonctionnement des modules de Proculture (El Jarroudi et al., 2011)

c)- Modèle EPIPRE

Epipre (synonyme de Epidemiology and prediction and prevention), développé aux Pays-Bas, est, à l'échelle mondiale, l'un des premiers modèles de la gestion des maladies du blé d'hiver (IVES et al., 1984 *in* El Jarroudi, 2005).

Le but de ce système était escompté par la conception de ce système opérationnel informatisé était de permettre aux agriculteurs de suivre l'état sanitaire de leurs cultures et de leur proposer des recommandations sur les modalités de traitements chimiques de leurs champs ainsi que les retombées économiques de telles décisions (RABBINGE & RIJSDIJK, 1984 ; Zadoks & Rijdsdijk, 1984 *in* El Jarroudi, 2005). En effet, dès les années 60, ZADOKS s'intéresse à la dynamique des épidémies. En 1971, il propose un modèle de développement de la population de parasites en intégrant les paramètres climatiques (Zadoks, 1971 *in* El Jarroudi, 2005). Il met en évidence les deux paramètres majeurs du développement des épidémies : la durée de la période de latence et le taux de multiplication du parasite. Epipre utilise, pour son fonctionnement, des données météorologiques journalières pour une période précise. Il ne donne aucune indication sur la période hivernale du fait que les données météorologiques antérieures à la période printanière ne sont pas incluses dans sa base de données. Ce système se base sur une fonction d'évaluation stochastique. L'agriculteur observe sa parcelle et à partir de cette seule donnée insérée par celui-ci, le système calcule l'évolution future de la maladie en se basant sur cette fonction stochastique. Ceci rend les prévisions de ce système peu discriminantes parce que les références de base fournies par l'agriculteur sont insuffisantes. (El Jarroudi, 2005).

d)- Modèle Proplant

Proplant a été développé en Allemagne pour prévoir un ensemble de maladies cryptogamiques de diverses plantes cultivées (blé d'hiver, betterave, colza, pomme de terre, ...). Ce système donne une indication sur l'état général des maladies présentes au niveau des champs. Cependant, l'absence d'indication sur les feuilles du blé d'hiver (émergence et développement de la maladie) ne permet d'estimer que vaguement l'utilité de procéder à un traitement.

e)- Presept

Développé en France dans les années 90 suite aux recherches de Rappilly & Jolivet (1976) sur le modèle Episept, Presept est un modèle basé sur les conditions climatiques. Ce modèle se base sur des données météorologiques horaires et utilise des méthodes mathématiques pour l'étude des processus stochastiques de développement des surfaces malades et des surfaces fructifiées. La méthodologie appliquée par le modèle Episept paraît très intéressante pour comprendre l'épidémiologie du parasite en fonction des conditions météorologiques. Cependant, le manque d'informations concernant la relation évolution du parasite - formation des feuilles - stade de la plante, rend les simulations du modèle Episept et, par conséquent, celles du Presept très régionales et très globales. (El Jarroudi, 2005).

La plupart de ces modèles ont été testés pour la prédiction des maladies cryptogamiques du blé y compris la rouille jaune, mais pas spécifiquement pour le triticale. De ce fait, nous ferons dans cette étude le test de l'un de ces modèles avec les paramètres météorologiques relevés pour le triticale.

Équation 8 : Tableau de comparaison des surfaces vertes aux surfaces atteintes

Date	GLAF1	YRF1	GLAF2	YRF2	GLAF3	YRF3	GLAF4	YRF4	GLAF5	YRF5
04/05/2020	100	0	100	0	100	0	99,98	0	97,46	0
11/05/2020	100	0	99,51	0	99,4	0	93,65	14,25	91,26	9,83
18/05/2020	99,26	6	94,31	12,87	92,89	14,26	86,54	12,64	62,05	14,45
25/05/2020	96,51	7,82	90	19,94	119,04	19,72	80,93	14,21	39,93	15,18
02/06/2020	95,06	13,82	89,04	29,95	88,85	21,83	72,45	12,71	36,14	0
08/06/2020	95,25	8,37	89,26	20,06	83,68	13,88	88,32	27,23		
15/06/2020	89,78	13	87,57	18,91	81,85	21,97	36,36	5		